

*UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS*

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR  
PARA ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE  
CONTROLE DE TRÁFEGO EM MALHA  
FECHADA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

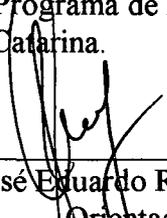
**RONEI MASCARENHAS DE BRITO**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1998

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR PARA ANÁLISE E  
PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO EM  
MALHA FECHADA**

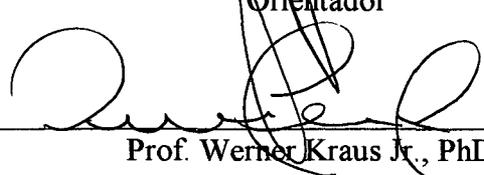
**RONEI MASCARENHAS DE BRITO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica, área de Controle, Automação e Informática Industrial**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.



---

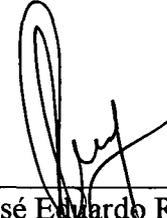
Prof. José Eduardo R. Cury, Dr. Et.  
Orientador



---

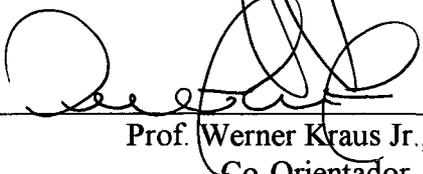
Prof. Werner Kraus Jr., PhD.  
Co-Orientador:

BANCA EXAMINADORA:



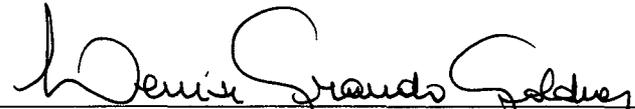
---

Prof. José Eduardo R. Cury, Dr. Et.  
Orientador



---

Prof. Werner Kraus Jr., PhD.  
Co-Orientador



---

Prof. Lenise Grando Goldner, D. Sc



---

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



---

Dhélio Pereira Rodrigues, Eng. (CSP)

*Dedico este trabalho a minha mãe, ao meu pai, a minha esposa, a meus sobrinhos: Samille, Yano, Lara e João Pedro, e a toda minha família e amigos.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço ao prof. Cury e ao prof. Werner pelos ensinamentos, críticas, discussões, incentivo e motivação. Agradeço por colaborarem para a existência de um clima favorável ao trabalho realizado e pelos momentos de descontração. A convivência com estas pessoas foi de fundamental importância para meu amadurecimento profissional e até mesmo pessoal.

Agradeço aos colegas, amigos e funcionários ligados ao LCMI, pelas dicas, sugestões e críticas que, até mesmo despreziosas algumas vezes, acabaram por contribuir positivamente com o trabalho. O ambiente multidisciplinar favorece o surgimento mais rápido de soluções para os diversos problemas que surgem no decorrer de um trabalho como este.

Por fim, agradeço a minha esposa e a minha mãe pela motivação, sem a qual tal tarefa se tornaria ainda mais difícil.

# ÍNDICE

<b>RESUMO</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES</b> .....	x
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2: INTERSEÇÕES ISOLADAS E SISTEMAS DE CONTROLE</b> .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Classificação dos Sistemas de Controle.....	5
2.3 Interseções Sinalizadas .....	7
2.4 Interseções Controladas por Convenção de Prioridade.....	9
2.5 Requisitos Básicos dos Sistemas de Controle.....	11
2.6 Sistemas de Controle de Interseções Isoladas Sinalizadas.....	12
2.6.1 Controle Pré-Temporizado (Controle em Malha Aberta) .....	12
2.6.2 Controle Realimentado (Controle em Malha Fechada) .....	14
2.7 Conclusão.....	16
<b>CAPÍTULO 3: VARIÁVEIS DE ESTADO DE TRÁFEGO</b> .....	17
3.1 Introdução .....	17
3.2 Definições das Variáveis.....	18
3.3 Conclusão.....	27
<b>CAPÍTULO 4: MODELOS PARA TEMPORIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE INTERSEÇÕES ISOLADAS SINALIZADAS</b> .....	28
4.1 Introdução .....	28
4.2 Modelo de Comportamento em Uma Interseção Isolada.....	29

---

4.2.1 Fluxo de Saturação (s) .....	30
4.2.2 Tempo Perdido (l).....	33
4.2.3 Tempo de Verde (k), Tempo de Verde Líquido e Tempo de Verde Efetivo (g) .....	34
4.2.4 Atraso (d) .....	35
4.2.5 Grau de Saturação (x) .....	35
4.3 Fórmula de Webster para o Atraso .....	36
4.4 Temporização para Sistemas de Ciclo Fixo.....	38
4.4.1 Split.....	38
4.4.2 Ciclo Ótimo.....	40
4.5 Capacidade.....	40
4.6 Conclusão.....	44
<b>CAPÍTULO 5: MODELO DE SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>46</b>
5.1 Introdução .....	46
5.2 Objetivos da Simulação .....	46
5.3 Modelo de Simulação .....	47
5.4 Ferramenta de Implementação e Metodologia Para Obtenção dos Resultados .....	53
5.5 Resultados e Validação do Modelo.....	56
5.6 Conclusão.....	58
<b>CAPÍTULO 6: ANÁLISE DE UM CONTROLE EM MALHA FECHADA PARA INTERSEÇÕES ISOLADAS .....</b>	<b>59</b>
6.1 Introdução .....	59
6.2 Métodos de Controle em Malha Fechada .....	59
6.3 Detalhes da Operação do CCR Implementado para Análise .....	61
6.3.1 Máximo Tempo de Espera (MaxTE) .....	61
6.3.2 Máximo Tempo Entre Detecções (MaxTED).....	62
6.3.3 Mínimo Tempo de Verde (MinTV) .....	63
6.4 Análise de Desempenho de um CCR.....	65
6.4.1 Análise do Parâmetro MaxTE.....	66

6.4.2 Análise do Parâmetro MaxTED.....	72
6.5 Comparação de Desempenho entre o CCR e o Sistema Pré-temporizado.....	75
6.6 Conclusão.....	81
<b>CONCLUSÃO FINAL .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>87</b>

## RESUMO

Esta dissertação relata o trabalho realizado para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica desempenhado pelo mestrando Ronei Mascareanhas de Brito. O trabalho consiste no desenvolvimento de um simulador para a análise de controladores de interseções isoladas de trânsito que funcionam sob o princípio de controle em malha fechada. Isto significa que as respostas do controlador são baseadas em informações colhidas sobre o estado corrente do tráfego, através de sensores, na região onde se localiza a interseção. Uma especificação de controlador em malha fechada, extraída da literatura, é implementada e analisada utilizando-se a ferramenta desenvolvida. Faz-se também uma comparação do desempenho deste controlador com o desempenho do controlador convencional pré-temporizado. Entre as contribuições do trabalho pode-se citar: o modelo de tráfego, que pode ser estendido para a análise de sistemas de interseções mais complexos e diversos tipos de controladores; o conhecimento gerado sobre o controlador em malha fechada analisado e a contribuição didática da dissertação propriamente dita, que traz uma coletânea de definições básicas em controle de interseções de trânsito, de interesse para os iniciantes desta área.

# ABSTRACT

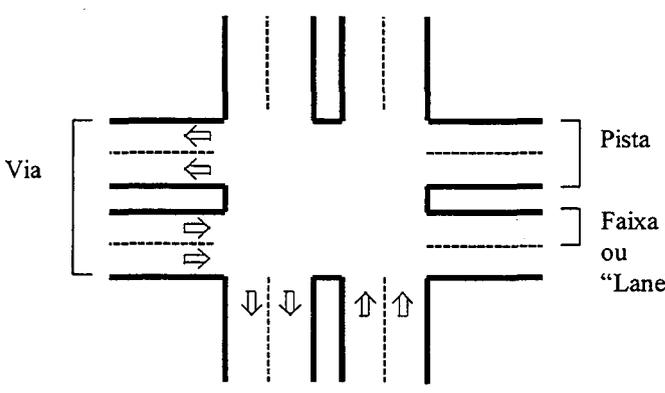
This text is a report about the job performed by Ronei Mascarenhas de Brito in order to get the Master Degree in Electrical Engineering. This work is concerned with the development of a simulator for traffic controllers of isolated intersections, which work based on the principle of closed-loop control (feedback control). This means that the controller's response takes account of information from the actual traffic state of the intersection area, gathered by sensors located in specific points. The developed simulation tool is used to analyze a traffic-actuated controller, whose specification was extracted from the technical references. The performance of the referred controller is compared against the performance of the usual controller, which is based on previously planned timing. The following contributions of this work can be remarked: the traffic model, which can be extended in order to analyze intersection systems and a number of distinct controllers; the raised knowledge about the traffic-actuated controller analyzed and the didactic contribution represented by this dissertation itself, which includes a number of basic definitions about traffic control for intersections, being of interest for those who are starting on this area.

# Terminologia e Definições

---

---

A terminologia apresentada não é necessariamente fiel à utilizada nos textos de engenharia de tráfego em português, apenas objetiva estabelecer um padrão de comunicação no contexto deste trabalho. Como a maioria da bibliografia utilizada é de língua inglesa, alguns termos são mantidos em inglês por falta de uma tradução apropriada. A maioria destas definições são também encontradas no texto.

<i>Símbolo</i>	<i>Termo</i>	<i>Definição</i>
	Vias, Pistas e Faixas	A Figura 0-1 ilustra o significado destes termos. 
	Interseção ou Cruzamento	É o local onde duas ou mais ruas se cruzam.
	Veículos	Um veículo pode ser um ônibus, caminhão, automóvel de passeio, moto, etc.
	Movimento	No decorrer deste texto, a palavra <i>movimento</i> será frequentemente empregada para designar os possíveis deslocamentos de veículos numa interseção, sobretudo sua direção e sentido. A direção e o sentido não precisam ser exatamente definidos, mas apenas o suficiente para deixar claro

as origens e destinos dos veículos. Na Figura 0-2, as setas numeradas de 1 a 4 representam movimentos.

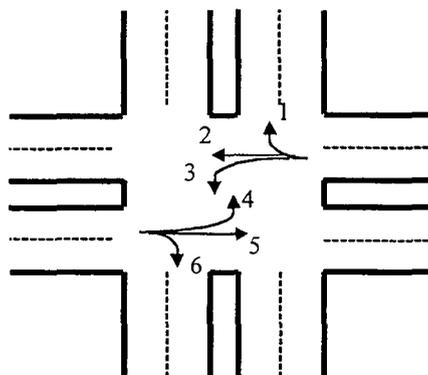


Figura 0-2

	Movimentos conflitantes ou em conflito	Frequentemente, as trajetórias formadas por dois movimentos são concorrentes em um determinado ponto de um cruzamento. Isto reflete um potencial para a ocorrência de acidentes em interseções. Na Figura 0-2, os movimentos 3 e 4 são conflitantes, enquanto que os pares 1 e 2, 1 e 3, 1 e 6 não são.
C	Ciclo, tamanho de ciclo ou comprimento de ciclo.	É o tempo reservado para que todos os conjuntos de movimentos possam ser contemplados.
	<i>Start Time</i>	É o tempo médio perdido na arrancada dos veículos quando a luz verde se acende. É composto, basicamente, pela soma do tempo de reação dos motoristas e do tempo necessário para acelerar os veículos até a velocidade normal de circulação.
I	Tempo perdido em uma única fase	É a quantidade de tempo dentro de um ciclo que é destinada aos movimentos desta fase, mas que não é efetivamente aproveitada, devido ao <i>start time</i> e devido à diminuição da taxa de descarga no fim do sinal amarelo.
	Fase	É a porção do ciclo que é reservada para um determinado conjunto de movimentos.

	Tempo de vermelho ou vermelho de foco	É o tempo durante o qual a luz vermelha do semáforo permanece acesa.
<b>a</b>	Tempo de amarelo, amarelo de foco ou amarelo	É o tempo durante o qual a luz amarela do semáforo permanece acesa.
<b>k</b>	Tempo de verde ou verde de foco	É o tempo durante o qual a luz verde do semáforo permanece acesa.
	Tempo de verde líquido ou verde líquido	É igual ao tempo de verde subtraído do <i>start time</i> na fase considerada.
<b>g</b>	Tempo de verde efetivo ou verde efetivo	Talvez um termo mais adequado para esta definição fosse <i>tempo efetivo de movimento</i> . No entanto, a literatura de língua inglesa utiliza <i>effective green time</i> . É o tempo de verde somado ao tempo de amarelo e subtraído do tempo perdido na fase considerada.
<b>R</b>	Vermelho de segurança ou vermelho geral	É o intervalo de tempo, pertencente ao ciclo, em que nenhum conjunto de movimentos tem o direito de passagem pela interseção. A luz vermelha fica acesa em todos os semáforos da referida interseção, por questões de segurança.
	Atraso	É definido como a diferença entre o tempo de viagem através da interseção e o tempo de viagem que seria gasto para um veículo percorrer o mesmo percurso, sem que tivesse que parar numa fila ou diminuir sua velocidade por causa da interseção.

<b>d</b>	Atraso médio para os veículos provenientes de uma determinada faixa de rua.	É a média aritmética dos atrasos sofridos pelos veículos que circulam em uma determinada faixa de rua ao passarem por uma interseção.
<b>D</b>	Atraso Total Médio	É a média aritmética dos atrasos de todos os veículos que passam na interseção.
	Capacidade de uma interseção	É o fluxo total máximo de veículos que pode passar através da interseção em condições operacionais ✓
<b>h</b>	<i>Headway</i>	É o tempo que separa a passagem de pontos correspondentes, geralmente o pára-choque dianteiro, de dois veículos consecutivos por uma referência.
<b>h<sub>s</sub></b>	<i>Headway de saturação</i>	É o <i>headway</i> que corresponde ao <u>fluxo de saturação</u> .
<b>y</b>	Taxa de ocupação de uma faixa de pista	É a relação entre o fluxo $q$ observado na faixa e o fluxo de saturação $s$ da faixa

# Capítulo 1: Introdução

---

A eficiência dos sistemas de transporte, bem como dos sistemas de telecomunicações e de outros aparatos da vida moderna, são prerequisites para o bem estar econômico e social de uma nação. Na grande maioria das vezes, os bens de consumo e serviços são produzidos em locais diferentes de seus centros consumidores, as pessoas habitam distante de seus locais de trabalho, enfim, infinitas necessidades de locomoção de pessoas, produtos e serviços podem ser identificadas. O transporte é uma parcela importante do custo de tudo aquilo que é produzido em um país. O processo de transporte é um processo intermediário e de grande peso no processo global de geração de riqueza, e deve ser eficiente ou poderia comprometer todos os outros esforços realizados em busca do sucesso.

Um problema enfrentado diariamente por condutores de veículos nos centros urbanos é o atraso a que são submetidos ao passarem por um cruzamento de vias. O atraso sofrido pelos condutores é um fator gerador de ineficiência econômica e de má qualidade de vida. Se forem somados os minutos que cada indivíduo perde em frente a um semáforo, durante todos os dias de sua vida, chega-se à conclusão que um percentual importante da capacidade produtiva deste indivíduo é perdida e que o desgaste físico e mental também é muito grande. Mesmo que cada cidadão utilizasse este tempo para lazer, ao invés de produção, ainda assim haveria um enorme ganho para a sociedade em termos de qualidade de vida.

Outro problema, ainda mais grave, decorrente dos cruzamentos, é a geração de potencial para a ocorrência de acidentes entre veículos. Alguma espécie de controle nas interseções é, portanto, necessária para resolver questões de segurança e organização em situações onde existe conflito entre dois ou mais movimentos de veículos e, também, para reduzir o atraso. Em certas situações, resolve-se o problema da segurança, mas agrava-se o atraso. Como a segurança é uma questão primordial, não se pode deixar de optar por estes sistemas de controle sempre que o potencial para ocorrência de acidentes ultrapassar um certo limite. Resta aos projetistas destes sistemas fazerem com que os transtornos decorrentes sejam os menores possíveis, ou seja, que o atraso no percurso dos veículos seja mínimo e que pelo cruzamento possa passar o maior número possível de veículos. Tais objetivos nem sempre podem ser alcançados completamente, pois alguns deles são conflitantes. Pode-se dizer que o projeto de um sistema de controle busca o melhor compromisso factível entre

segurança, ordem, atraso médio dos veículos, capacidade operacional do cruzamento e custo.

Estas colocações destacam a necessidade de se ter disponíveis ferramentas capazes de auxiliar o projeto e dimensionamento de controladores de interseção. No caso dos controladores convencionais, cujos tempos de verde e vermelho são calculados previamente e permanecem fixos, ou variam de acordo com um cronograma também estabelecido previamente, a literatura ([1], [2], [3], [4] e [5]) traz orientações e métodos de dimensionamento ótimo dos tempos, baseados no critério da atraso e da capacidade da interseção. Alguns destes métodos têm sido utilizados desde algum tempo (Webster 1958 [1]) para o dimensionamento da configuração de controladores pré-temporizados em interseções isoladas.

No que diz respeito aos controladores que incorporam avanços tecnológicos de automatização e controle, como é o caso dos controladores inteligentes, necessita-se de uma ferramenta flexível, capaz de tratar as peculiaridades particulares de cada implementação. Entende-se por “inteligente” o sistema que ajusta automaticamente os tempos de verde atribuídos a cada conjunto de movimento de veículos, de acordo com a necessidade corrente, ao contrário dos sistemas convencionais pré-temporizados, que põem em prática planos preestabelecidos. Esta dissertação trata de um tipo de controlador inteligente, baseado no princípio de controle em malha fechada, que será referido como controlador realimentado. As possibilidades de implementação e de modos de operação diferentes para este tipo de controlador são muitas. Os diversos tipos de sensores que podem ser utilizados para colher as informações sobre o estado do tráfego, os diversos algoritmos para o tratamento destas informações e posterior comando de atuação, bem como os detalhes específicos de cada interseção, que influenciam no desempenho final do controlador, demandam uma ferramenta de análise flexível, capaz de tratar estes aspectos.

Este trabalho de dissertação trata do desenvolvimento e implementação de um modelo de simulação para avaliação de desempenho de sistemas de controle em malha fechada para interseções isoladas. O modelo e a plataforma de desenvolvimento são adequados tanto para a análise de controladores convencionais pré-temporizados como para controladores inteligentes. Talvez a pouca difusão de conhecimento sobre este tipo de controlador, bem como de ferramentas de análise adequadas, tenham sido, juntamente com o custo, alguns dos fatores limitantes do avanço da utilização de tais controladores. Espera-se com isto estar contribuindo para o aprimoramento da metodologia de desenvolvimento, projeto e planejamento de sistemas de controle de tráfego, que pode efetivamente ser utilizada na otimização das soluções dos problemas de controle de interseções.

Além da ferramenta de análise citada e do conhecimento específico gerado pela análise de um controlador realimentado clássico, este trabalho traz a experiência do uso de uma plataforma de desenvolvimento de simuladores de sistemas a eventos discretos (SED's) de propósito geral na solução de um problema específico de controle de tráfego. Tal ferramenta foi o AUTOMOD® [7], que é um simulador geralmente utilizado para a modelagem de sistemas de automação industrial, voltado para a análise de desempenho de produção. Este *software* oferece a flexibilidade necessária para a implementação das mais variadas estratégias de controle. Características como estas foram necessárias para a plataforma de desenvolvimento, uma vez que o objetivo era o de implementar o modelo de simulação de um controlador em malha fechada.

Nesta dissertação, apresenta-se também um apanhado de tópicos básicos relacionados ao foco principal, como sendo uma forma de promover um panorama introdutório sobre tráfego. Esta etapa foi de grande importância para o autor e para os orientadores deste trabalho no processo de definição de uma nova linha de pesquisa. Além disto, a decisão de registrar esta revisão bibliográfica, capítulos 2 a 4, passou a se constituir um dos objetivos integrantes do trabalho de dissertação, devido ao valor didático incorporado.

Com o objetivo de orientar a leitura deste documento apresenta-se a organização de seus capítulos:

- Inicialmente apresenta-se, em forma de tabela, alguns termos, definições e simbologia utilizados no texto, sob o título de “Terminologia e Definições”.
- O Capítulo 1 é o que está sendo lido neste momento e é a introdução desta dissertação.
- O Capítulo 2 é um apanhado de vários tópicos relacionados a controle de tráfego, especialmente dedicado aos que não estão familiarizados com a área. Introduce-se algumas classificações de sistemas de controle de interseção, critérios para avaliação de desempenho de sistemas de controle, alguns resultados da literatura e algumas outras definições.
- O Capítulo 3 trata das variáveis de estado de tráfego. Este capítulo traz uma série de definições e fórmulas que são úteis sobretudo para os sistemas de controle realimentado. Apresenta-se um material de abrangência mais que necessária para o desenvolvimento dos futuros capítulos, mas que permanece devido ao interesse didático já manifestado anteriormente.

- O capítulo 4 trata do modelo analítico de Webster (1958) [1] para a avaliação do atraso em interseções isoladas controladas por sistemas pré-temporizados e da definição e avaliação da capacidade de interseções. Este capítulo, juntamente com os capítulos 2 e 3, constitui a parte da dissertação referente à revisão bibliográfica.
- O Capítulo 5 discute o modelo de simulação proposto neste trabalho de dissertação, bem como sua validação. Apresenta também, em detalhes, as hipóteses do modelo de Webster [1]. A discussão apresentada sobre o modelo de Webster é relativamente rara, não tendo sido encontrada, com a mesma profundidade, em nenhum dos títulos pesquisados, exceto no documento original de Webster [1]. O modelo de simulação implementado incorpora a maioria destas hipóteses.
- O Capítulo 6 trata da especificação e análise de desempenho por simulação de um controlador realimentado extraído da literatura ([4] e [5]). Além disto, apresenta uma comparação de desempenho deste controlador com o controlador pré-temporizado.

Esta introdução não poderia ser finalizada sem que tivesse sido dito que este trabalho inaugura a linha de pesquisa em Controle de Tráfego do Departamento de Automação e Sistemas da UFSC (DAS). Espera-se que este trabalho e os que estão por vir contribuam não só para o enriquecimento do estado da arte no assunto, mas para a solução de problemas específicos e reais da área e para a formação de pessoal qualificado.

# Capítulo 2: Interseções Isoladas e Sistemas de Controle

---

---

## 2.1 Introdução

**E**ste capítulo apresenta uma coletânea de assuntos relacionados a interseções isoladas e sistemas de controle que objetiva situar o leitor não familiarizado com tráfego, além de discutir alguns resultados importantes da literatura.

O foco principal são os cruzamentos isolados controlados por semáforos automáticos de trânsito, conhecidos como interseções sinalizadas ou cruzamentos sinalizados. É importante, no entanto, fornecer uma visão um pouco mais abrangente sobre controle de tráfego, motivo pelo qual apresenta-se um rápido panorama em torno do tema de interesse.

A seção 2.2 apresenta uma classificação de sistemas de controle utilizada por [4]. A seção 2.3 fala dos conflitos que ocorrem nas interseções como sendo um dos problemas que se busca resolver quando se instala um sistema de semáforos. Além disto, introduz definições básicas relacionadas ao controle de interseções. A seção 2.4 traz um resultado sobre interseções não-sinalizadas extraído de [5], onde se mostra que, sob certas condições, não existe vantagem em instalar um controlador sinalizado em uma interseção. A seção 2.5 esclarece quais são os benefícios que os engenheiros efetivamente procuram atingir ao projetar uma interseção e seu sistema de controle. Em especial, fala-se da redução do atraso e do aumento da capacidade. Por fim, a seção 2.6 fala sobre os sistemas de controle com temporização fixa e sistemas em malha fechada.

## 2.2 Classificação dos Sistemas de Controle

É importante que sejam dadas algumas classificações para situar o trabalho dentro de um contexto mais abrangente. As formas de controle de tráfego em interseções podem ser classificadas em [4]:

- Interseções sinalizadas: São aquelas nas quais a permissão de passagem é dada por semáforos de trânsito. Os movimentos conflitantes<sup>1</sup> são separados no tempo, ou seja, são impedidos de ocorrer simultaneamente pelas regras de trânsito associadas aos semáforos.
- Interseções não-sinalizadas<sup>2</sup> : Neste caso, o controle é realizado pelos próprios condutores dos veículos. Entre as chamadas interseções não-sinalizadas, estão as *interseções por prioridade*, nas quais, aos veículos da via principal é dada a prioridade de passagem, enquanto que os veículos da via secundária devem aguardar até que ocorra um intervalo de tempo suficientemente seguro entre a passagem de dois veículos consecutivos na via principal, para que estes possam atravessar a interseção.

Os sistemas de controle sinalizado de tráfego urbano podem ser classificados, de acordo com a configuração, dimensões e influência mútua entre as interseções do sistema a ser controlado, em quatro categorias:

- Controle de Interseções Isoladas - É o tipo de controle sinalizado feito em interseções cujas condições de tráfego não são afetadas por outras interseções em sua vizinhança.
- Controle de Interseções Arteriais (*Open Networks*) - É o controle coordenado de interseções sinalizadas ao longo de uma avenida arterial, onde o objetivo principal é promover um fluxo progressivo ao longo da artéria. Entende-se por fluxo progressivo aquele que, uma vez iniciado, não é interrompido em cada interseção. Neste caso, ao contrário do controle de interseções isoladas, as interseções devem ser consideradas como elementos de um sistema cujo comportamento se deseja controlar.
- Controle de Redes Fechadas de Interseções (*Closed Networks*) - É uma forma de controle utilizado para um grupo de interseções adjacentes que devem ser operadas de forma coordenada. Um conjunto de interseções que se influenciam mutuamente no centro de uma grande cidade é um exemplo de aplicação para este tipo de sistema.

---

<sup>1</sup> Veja definição em Terminologia e Definições.

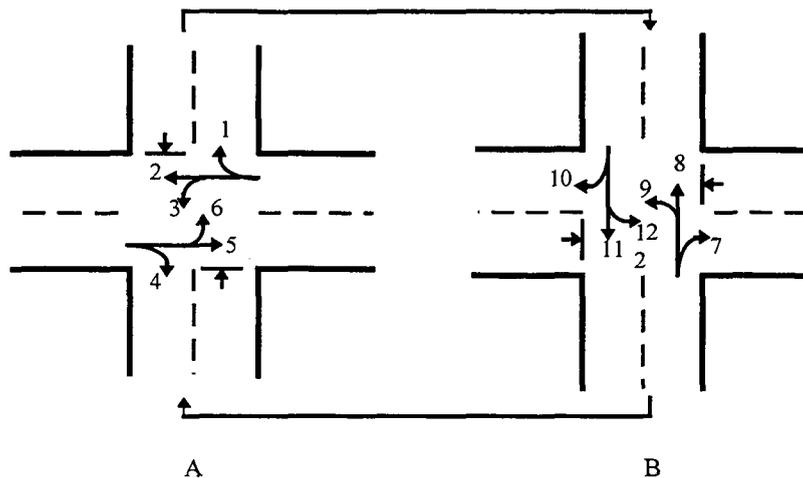
<sup>2</sup> A denominação “não sinalizada” refere-se apenas a inexistência dos sinais luminosos (semáforos). Estas interseções possuem placas de trânsito do tipo PARE, ou semelhante, para estabelecer a relação de prioridade na interseção.

- Controle por Área (*Areawide System Control*): É uma forma de controle de tráfego que trata todos os sinais de trânsito de uma cidade, ou uma porção grande deles, como um sistema. Cada interseção individual pode ser controlada por um sistema de Interseção Isolada, Interseções Arteriais ou Rede Fechada, mas existe um controle central, num nível hierárquico superior, que coordena informações provenientes destes subsistemas e envia comandos que influenciam o comportamento dos mesmos.

### 2.3 Interseções Sinalizadas

Considere a Figura 2-1 a seguir. Ela mostra duas fotografias de uma interseção em dois instantes distintos de tempo. Chamaremos o conjunto de movimentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 de conjunto A e os movimentos 7, 8, 9, 10, 11 e 12 de conjunto B. Na fotografia A, os movimentos do conjunto A são permitidos e os do B proibidos. Na fotografia B, os movimentos do conjunto B são permitidos e os do conjunto A são proibidos. Alguns movimentos do conjunto A estão em conflito com alguns movimentos do conjunto B e, portanto, não podem ocorrer simultaneamente, são excludentes.

O sistema de semáforos de trânsito separa no tempo os conjuntos de movimentos conflitantes. Uma das primeiras tarefas que deve ser realizada no projeto de um cruzamento sinalizado é identificar os conjuntos apropriados de movimentos (diagrama de estágios) de forma a que todos os movimentos possam ser contemplados em algum intervalo de tempo, minimizando os conflitos. Um determinado movimento pode estar contido em dois ou mais destes conjuntos. Dois conjuntos serão o mesmo quando contiverem os mesmos movimentos, não importando se estão separados no tempo. Algumas vezes existem movimentos conflitantes dentro do mesmo conjunto, por exemplo, os movimentos 2 e 6, 3 e 5, 3 e 6 no grupo A. Isto pode acontecer quando os fluxos de veículos associados a estes movimentos são suficientemente pequenos para não necessitarem de uma separação no tempo. Neste caso prevalece, entre os pares de movimentos conflitantes, o sistema de controle não sinalizado. Pode-se ver, como neste exemplo, que sistemas sinalizados e não sinalizados de controle podem coexistir numa mesma interseção.



**Figura 2-1 - Diagrama de estágios para o cruzamento mostrando dois conjuntos de movimentos separados no tempo**

As definições a seguir estão relacionadas ao controle sinalizado de interseções:

- *Comprimento de Ciclo, Tempo de Ciclo ou simplesmente Ciclo*: é definido como o tempo necessário para que todos os conjuntos de movimentos sejam contemplados. Considere um determinado conjunto de movimentos A e o instante de tempo em que o direito de passagem deste conjunto de movimentos se inicia. O tempo decorrido entre este instante e o próximo início do direito de passagem do conjunto A, depois que todos os outros conjuntos da mesma interseção já foram contemplados, chama-se ciclo.
- *Fase*: é a porção do ciclo que é alocada para um determinado conjunto de movimentos. Durante a fase de um determinado conjunto de movimentos, todos os movimentos contidos nele têm a permissão de passagem. Uma mesma fase pode ser dividida dentro do ciclo. Isto ocorre quando é dado o direito de passagem a um mesmo conjunto de movimentos durante dois intervalos distintos dentro do mesmo ciclo. Wilshire et al [4] frequentemente utiliza o termo fase para fazer referência ao próprio conjunto de movimentos.
- *Split*: o *split* de um ciclo é a forma como este ciclo está dividido entre as fases, mais precisamente, é o conjunto de frações do ciclo atribuídas a cada fase.
- *Offset*: o *offset* de uma interseção é o instante do início da luz verde em um dos semáforos da interseção, medido em relação a um relógio de referência comum a

todas às interseções de um sistema. O *offset* se aplica na sincronização entre interseções que são operadas de forma coordenada como um sistema.

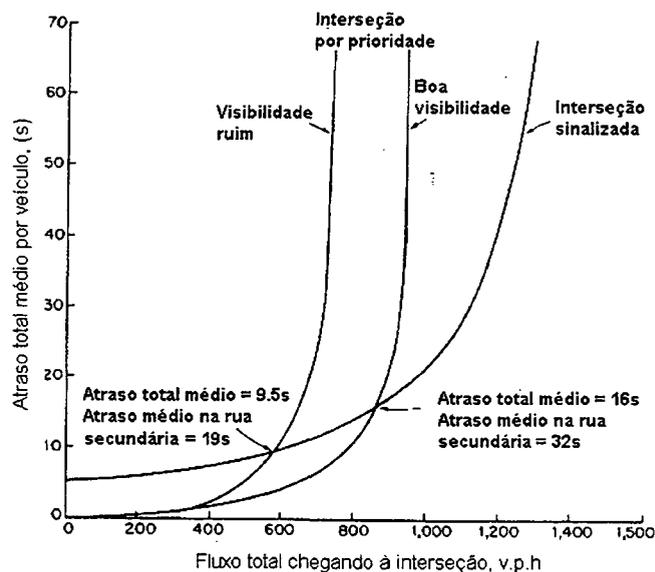
- *Vermelho de Segurança* ou *Vermelho Total*: é o intervalo de tempo em que nenhum conjunto de movimentos tem o direito de passagem. A luz vermelha fica acesa em todos os semáforos, por questões de segurança. Um sistema de controle não precisa necessariamente utilizar o vermelho de segurança.

## 2.4 Interseções Controladas por Convenção de Prioridade

As interseções por prioridade são aquelas onde não existe nenhum outro tipo de controle, a não ser uma convenção preestabelecida que atribui a prioridade de passagem a um determinado conjunto de movimentos não conflitantes. A prioridade de passagem geralmente é dada à via principal. A via secundária, que não possui a prioridade, é controlada por meio de placas do tipo PARE. Isto, a princípio, irá assegurar que os veículos da via prioritária não sofrerão nenhum atraso, ao passo que os veículos da via secundária serão atrasados enquanto esperam por um intervalo de tempo seguro entre a passagem de dois veículos na via principal, para que possam atravessar a interseção. Na verdade, os veículos da via principal também acabam sendo atrasados pelo efeito do sentimento de insegurança dos condutores de veículos. Os condutores da via principal não ficam totalmente seguros de que um veículo da via secundária não vai atravessar em sua frente e, por isso, reduzem a velocidade de seus veículos na esperança de minimizarem os efeitos de um eventual acidente. Esse efeito é ainda mais acentuado quando as condições de visibilidade na região da interseção estão comprometidas, devido à neblina, por exemplo. Outro motivo de atraso dos veículos da via secundária é a espera na fila, cujo tamanho tende a aumentar, tanto com o aumento do fluxo da via secundária, como com o aumento do fluxo da via principal, pois, neste último caso, a frequência de surgimento de intervalos seguros diminui. A Figura 2-2, a seguir, ajuda a concluir que o atraso dos veículos da via secundária pode se tornar inaceitável a partir de um determinado volume de tráfego [5].

Instalando-se um controle sinalizado na interseção, os veículos da via secundária não precisarão mais esperar por um intervalo de tempo seguro, mas precisarão esperar pela indicação de luz verde. No entanto, esta espera é controlada e geralmente possui um limite conhecido. Por outro lado, os veículos da via principal serão agora atrasados durante sua espera pelo sinal verde.

A Figura 2-2 mostra que o atraso médio por veículo que utiliza a interseção, para cada sistema de controle considerado, depende dos fluxos nas vias. Este resultado foi obtido de forma teórica por simulação [5]. A interseção considerada possui geometria em “T”. A razão entre os fluxos da via secundária e da via principal é de 1:1. Para a situação na qual o controle é sinalizado, o fluxo de saturação<sup>3</sup> é de 1800 v.p.h. na rua principal e 1200 v.p.h. na rua secundária. Sob controle por prioridade, na rua secundária, o fluxo de saturação é de 1200 v.p.h., com boa visibilidade, e 720 v.p.h., para visibilidade ruim. O intervalo mínimo de tempo considerado seguro para um veículo atravessar a interseção, sob controle por prioridade, é de 8s.



**Figura 2-2 - Comparação de desempenho entre *interseções por prioridade* e *interseções sinalizadas*.**

Observa-se que, para volumes leves de tráfego, o sistema de prioridade fornece um melhor desempenho pelo critério do atraso, enquanto que, para volumes maiores, o sistema sinalizado desempenha melhor. Portanto, existe um nível de demanda abaixo do qual não vale a pena instalar um sistema sinalizado. A figura também mostra que este nível de demanda depende das condições de visibilidade nas proximidades da interseção.

É necessário ficar claro, entretanto, que o sistema de controle sinalizado analisado na Figura 2-2 é do tipo temporização fixa e que outros tipos de controle podem apresentar um melhor resultado também para baixos volumes de tráfego.

<sup>3</sup> Ver seção 4.2.1.

## 2.5 Requisitos Básicos dos Sistemas de Controle ( *Medidas de Desempenho* )

Os requisitos básicos que devem ser considerados no projeto do sistema de controle e do *layout* de uma interseção são:

- Segurança;
- Organização dos movimentos;
- Atraso médio dos veículos e
- Capacidade da interseção.

Definições:

- O *atraso* é definido como a diferença entre o tempo de viagem através da interseção e o tempo de viagem que seria gasto para um veículo percorrer o mesmo percurso sem que tivesse que parar numa fila ou diminuir sua velocidade por causa da interseção [3]. O *atraso médio* é definido como a média aritmética dos atrasos dos vários veículos que cruzam a interseção. As fontes de atraso são os tempos gastos na aceleração e desaceleração dos veículos quando submetidos às condições da interseção e o tempo de espera em sinal vermelho.
- A *capacidade da interseção* é o fluxo total máximo de veículos que pode passar através da interseção em condições operacionais, ou seja, a capacidade não é uma propriedade da interseção propriamente dita, mas de todos os elementos, envolvendo o controle e as condições de tráfego. Fluxo total refere-se a todos os veículos que passam na interseção, não importando de onde venham nem para onde vão, dividido pelo tempo total de observação.

Idealmente, é desejável reduzir ao máximo o atraso dos veículos, maximizar a capacidade da interseção e reduzir o potencial de ocorrência de acidentes. Infelizmente estes requisitos não são sempre compatíveis. Por exemplo, num cruzamento isolado com temporização fixa, o atraso pode ser minimizado utilizando o menor número possível de fases e o menor comprimento de ciclo possível<sup>4</sup>, enquanto

---

<sup>4</sup> A palavra “possível” quer dizer “no mínimo igual ao ciclo ótimo”. Como será visto no capítulo onde é introduzida a fórmula de Webster, a curva do atraso em função do ciclo cresce rapidamente para valores menores do que o ciclo ótimo, e cresce a taxas bem menores para valores acima do ótimo. Por questão de segurança, para não cair na faixa de crescimento rápido, muitas vezes utiliza-se ciclos acima do ótimo.

que para reduzir o potencial de acidentes, múltiplas fases e ciclos mais longos<sup>5</sup> devem ser considerados. Portanto, no projeto de tais sistemas, deve ser estudado qual o melhor compromisso entre estes requisitos para cada interseção.

## 2.6 Sistemas de Controle de Interseções Isoladas Sinalizadas

Os sistemas de controle de interseções isoladas sinalizadas podem ser classificados em:

- Controle Pré-temporizado (Controle em Malha Aberta) e
- Controle Realimentado (Controle em Malha Fechada).

Cada tipo de controle fornece desempenho e custo que variam de acordo com cada interseção. Devido à relativa complexidade do problema e à rápida mudança no estado da arte dos sistemas, não existe um método universal para determinar qual sistema é mais adequado para determinada interseção. Alguns trabalhos, entretanto, fornecem linhas gerais de projeto [4], [5]. Este é justamente um dos pontos de que trata este trabalho, ao fazer comparações entre estratégias de controle utilizando simulação.

### 2.6.1 Controle Pré-temporizado (Controle em Malha Aberta)

Tais sistemas de controle atribuem o direito de passagem de acordo com planos predeterminados com base em observações anteriores das características do tráfego na interseção considerada. O Ciclo, o *split* e a sequência das fases são predeterminados. Estes sistemas não possuem detetores para monitorar as condições de tráfego corrente. Caso existam, as suas saídas não são utilizadas para alterar a resposta do controlador de acordo com a demanda corrente. Devido ao fato destes controladores não utilizarem informações sobre o estado corrente do tráfego para alterar suas respostas, eles podem ser classificados como Sistemas de Controle em Malha Aberta<sup>6</sup>. A grosso modo, isto quer dizer que não existe um “laço” de controle, uma interação dinâmica

---

<sup>5</sup> A adoção de tempos de vermelho de segurança, por exemplo, levam a ciclos mais longos.

<sup>6</sup> Esta é uma terminologia da área de Controle e Automação que considerou-se apropriado introduzir, uma vez que os conceitos de controle estão presentes e se farão necessários no decorrer deste texto e na continuação desta linha de pesquisa.

entre o controlador e o processo a ser controlado.

As características básicas do sistema pré-temporizado são [4]:

- Ciclo fixo;
- *Split* fixo e
- Sequência e número fixo de fases.

No entanto, nada impede que existam vários planos, cada um com seu valor de ciclo, *split* e os outros parâmetros, pré-temporizados de acordo com a demanda observada em instantes diferentes do dia. Por exemplo, um plano para os horários de pico e outro para os horários de demandas leves. Tais planos não deixariam de ser pré-temporizados, apenas haveriam vários planos a serem postos em operação de acordo com uma regra fixa, também convencionalmente anterior. Portanto, talvez uma boa definição para sistemas pré-temporizados seria: *um sistema que põe em ação planos pré calculados, de acordo com estratégias pré definidas, e que não interage com o ambiente em tempo de operação.*

De acordo com Wilshire et al [4], o controle pré-temporizado é adequado para interseções cujas condições de tráfego são previsíveis e para aquelas onde frequentemente ocorrem condições de saturação<sup>7</sup>.

Neste ponto, a seguinte pergunta pode ser feita: Como os parâmetros do sistema de controle (ciclo, *split*, sequência de fases, etc.) são determinados? Várias soluções analíticas para este problema foram propostas por vários pesquisadores ([2], [3] e [5]). Uma das mais famosas e utilizadas é a fórmula de Webster (1958) [1], que é discutida no capítulo 4. Métodos baseados em simulação por computador são também utilizados, principalmente para sistemas complexos como *Closed* e *Open Networks* [4]. Outra forma de realizar tal tarefa é fazer um ajuste em campo, tomando-se como base um pré cálculo baseado numa das técnicas anteriores [4]. Uma técnica de pré-temporização, ou mesmo de controle em malha fechada, está sempre buscando otimizar o desempenho do sistema de sinais no que se refere ao atraso, capacidade e segurança na interseção.

---

<sup>7</sup> A condição de saturação será definida mais adiante.

### 2.6.2 Controle Realimentado (Controle em Malha Fechada)

A característica básica deste tipo de sistema é que ele determina os instantes em que cada fase inicia e termina de acordo com o estado corrente do tráfego. O estado corrente é determinado com base em informações colhidas por detetores instalados nas ruas que formam a interseção.

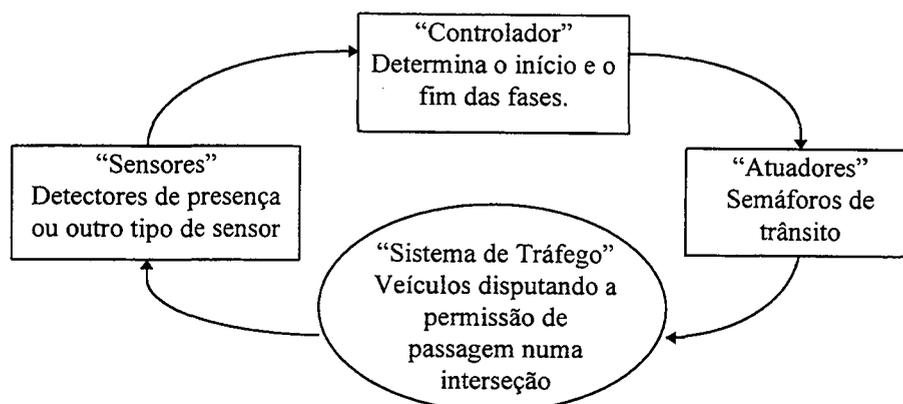


Figura 2-3- Laço de controle

O controle realimentado<sup>8</sup> de tráfego, tal como descrito no parágrafo anterior, se encaixa dentro da definição de Controle de Sistemas em Malha Fechada, que é um termo bastante usado na área de Controle e Automação e pouco utilizado na literatura de tráfego<sup>9</sup>. A idéia por trás de um sistema de controle em malha fechada aplicado a tráfego é tal como ilustrada pela Figura 2-3. O processo a ser controlado é o de atribuição da permissão de passagem às várias demandas de veículos que estão competindo pela interseção. Os sensores encarregam-se de extrair informações que descrevem o estado do sistema de tráfego de forma mais ou menos precisa, dependendo do tipo de sensor e do pós-processamento realizado. Essas informações são enviadas ao controlador que toma decisões para influenciar o sistema, as quais são colocadas em prática pelos semáforos de trânsito. O objetivo do sistema de controle é alocar as permissões de passagem de forma a que o sistema tenha o melhor desempenho possível segundo um determinado critério<sup>10</sup>.

<sup>8</sup> *Traffic-actuated signals* na literatura de língua inglesa.

<sup>9</sup> O termo “controle em malha fechada” foi raramente mencionado na bibliografia consultada. No entanto, a referência [4] traz uma breve discussão sobre o assunto em seu cap. 2, introduzindo a idéia de *closed-loop* em controle de tráfego. O mesmo termo é largamente utilizado em engenharia de controle e automação e adotado neste texto.

<sup>10</sup> Ver “Requisitos Básicos dos Sistemas de Controle”, seção 2.5.

A diferença entre os sistemas de controle realimentado está basicamente no tipo e na quantidade de informação sobre o estado do tráfego que eles utilizam para tomar decisões; na forma como as informações são manipuladas; no número, natureza e posicionamento dos detetores e no próprio algoritmo de controle.

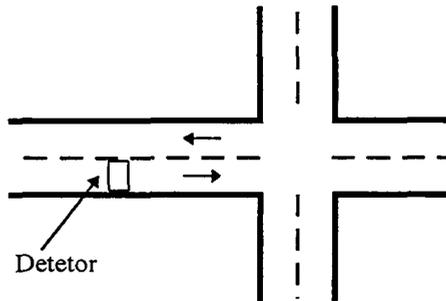


Figura 2-4- Detetor pontual

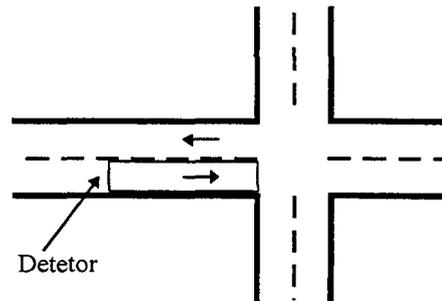


Figura 2-5- Detetor de anel longo

Muitos sistemas de controle de tráfego malha fechada possuem a configuração básica de posicionamento de sensores mostrada na Figura 2-4 e Figura 2-5. Os sensores podem ser do tipo pontual, que detecta presença localizada, ou do tipo que detecta presença em uma seção extensa de uma via, como, por exemplo, os detetores de anel longo.

Os parâmetros que podem ser ajustados por estes sistemas, em tempo real de operação, são basicamente:

- Tempo de sinal verde;
- Tempo de sinal amarelo;
- Tempo de vermelho;
- Sequência de fases; e
- Ciclo.

A sequência em que os sucessivos conjuntos de movimentos são contemplados pode ser alterada, por exemplo, “pulando-se” uma fase<sup>11</sup>, ou seja, não permitindo a ocorrência de um determinado conjunto de movimentos durante um determinado ciclo. Isto pode ser útil quando não existe demanda suficiente para tal conjunto de

---

<sup>11</sup> *Skip fase* na literatura de língua inglesa

movimentos, por exemplo. Enfim, existem vários graus de liberdade que podem ser utilizados para desenvolver estratégias de controle em malha fechada.

Os controladores de sistemas em malha fechada podem ainda ser classificados de acordo com a técnica utilizada para determinar as possíveis respostas do controlador.

- Técnicas *Off-Line*: Se o espaço de possíveis respostas de um controlador for previamente definido, diz-se que o controlador utiliza uma técnica de temporização *off-line*. O funcionamento básico de tais sistemas consiste na seleção do conjunto de parâmetros que melhor se adapta à demanda corrente, dentre aqueles que foram definidos previamente. Estes vários planos, que são armazenados pelo sistema, podem ser determinados pelos mesmos métodos utilizados em controle pré-temporizado.
- Técnicas *On-Line*: Se as respostas do controlador forem geradas em tempo real, sem recorrer a um banco de dados previamente calculado, diz-se que o sistema utiliza técnica de temporização *on-line*.

## 2.7 Conclusão

Com este capítulo, espera-se ter introduzido o leitor na problemática do controle de interseções isoladas. Inicialmente, foi apresentada uma classificação dos sistemas de controle quanto a existência ou não de semáforos, seguida por uma classificação quanto a complexidade e abrangência do sistema de controle. Os conceitos relacionados a controle sinalizado, quais sejam, ciclo, fase, *split* e vermelho de segurança, foram introduzidos. Foi mostrado que um sistema sinalizado nem sempre é a melhor solução para um cruzamento isolado [5]. Em seguida, o estudo sobre métodos de controle foi iniciado com a apresentação dos requisitos básicos de desempenho de sistemas de controle e da discussão sobre controle pré-temporizado e controle realimentado. Foram introduzidas as idéias de controle em malha aberta e em malha fechada aplicadas a tráfego.

# Capítulo 3: Variáveis de Estado de Tráfego

---

---

## 3.1 Introdução

A motivação para o estudo dos assuntos abordados neste capítulo surgiu da necessidade de se conhecer os meios de caracterização de um determinado sistema de tráfego, no sentido de descrever e definir o estado do sistema. O conhecimento do estado do sistema e/ou do histórico dos estados é importante tanto para os projetistas de sistemas de tráfego, determinando as decisões de projeto, como também para os sistemas automatizados de controle de tráfego em geral.

Sendo os sistemas de tráfego objetos complexos de estudo, torna-se difícil a tarefa de caracterização de seus estados. Em algumas situações, mais de uma variável deveria ser utilizada para realizar esta tarefa e, mesmo assim, o sistema ficaria apenas parcialmente definido. No entanto, um maior grau ou maior qualidade de caracterização implica em custos maiores, pois a tarefa de determinação dos estados requer sensores e outros elementos de *hardware* e *software* que acabam encarecendo o processo. Além disto, uma caracterização mais completa não implica necessariamente num ganho igualmente maior em termos de desempenho do controlador. O controlador de tráfego mais usualmente encontrado, o de ciclo fixo, nem mesmo utiliza informações de estado em tempo real, mas sim dados históricos. Outros possuem apenas capacidade de observação parcial do sistema. Sendo assim, a relação custo/benefício de caracterização deve ser cuidadosamente observada no projeto dos controladores de tráfego.

Este capítulo trata da definição das variáveis de estado de tráfego. Estas descrevem as condições do tráfego num determinado instante ou ao longo de um período, localmente ou numa extensão de área. Algumas delas podem ser medidas diretamente, outras são estimadas a partir de medições de outros parâmetros. Algumas das variáveis de tráfego apresentadas são utilizadas nos sistemas de controle em malha fechada. Elas são utilizadas como base para avaliar as respostas dos sistemas de controle. O tipo de variável que um controlador utiliza para determinar o estado do tráfego e, em seguida, produzir uma resposta de atuação sobre o mesmo, é um dos

fatores determinantes do desempenho do controlador. As variáveis mais usualmente utilizadas ([2] e [4]) são:

- Presença de Veículo
- Fluxo ou Volume
- Ocupação
- Velocidade
- Densidade
- *Headway*
- Tamanho de Fila

Outros indicadores, que dizem respeito ao ambiente, também podem ser utilizados como formas de caracterização estado do sistema observado, pois também interferem nas condições de tráfego, embora de forma não tão dinâmica como as variáveis apresentadas acima. São elas [4]:

- Condições de pavimentação das vias e
- Condições climáticas (chuva, sol, neve)

Os métodos de medição destas variáveis têm-se modificado ao longo do tempo em função dos avanços tecnológicos. Os primeiros trabalhos neste sentido foram realizados com a utilização de contadores e cronômetros manuais. Atualmente, vários tipos de detetores de presença estão disponíveis para os engenheiros, tais como: laços indutivos, magnetômetros e tecnologia de ultra-som [4].

### 3.2 Definições das Variáveis

#### • *Presença*

A presença ou ausência de um veículo num dado ponto de uma rodovia é definida como *presença*. Esta grandeza pode ser diretamente medida com o auxílio dos detetores de presença e é utilizada na determinação de outras grandezas que não podem ser diretamente medidas devido a alguma restrição tecnológica ou econômica. Um detetor de presença tem como característica básica o fato de fornecer um sinal de saída, indicando a presença de um veículo, durante todo o tempo em que o veículo está presente - chamado de modo ativo, ocupado, “*on*” ou “*closed*” - e um sinal indicando ausência, durante todo o tempo em que não há veículo sendo detectado - modo desocupado ou “*off*”. Portanto, a saída destes sensores corresponde diretamente à grandeza *presença*.

• *Fluxo ou Volume (q)*

É definido como o número de veículos que passam num dado ponto de uma via por unidade de tempo. A determinação experimental desta grandeza num ponto de uma rodovia é também uma tarefa relativamente simples, bastando para tanto contar o número  $N$  de veículos que passam no ponto de interesse durante um período de tempo  $T$  e aplicar a relação:

$$q = \frac{N}{T} \quad 3-1$$

• *Headway (h<sub>j</sub>)*

É o tempo que separa a passagem de pontos correspondentes, geralmente o pára-choque dianteiro, de dois veículos consecutivos por uma referência. No entanto, uma variável de maior interesse do que o *headway* associado a um único par de veículos, é o *headway* médio numa via, dado por:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad 3-2$$

Como pode ser notado, o fluxo é o inverso do *headway* médio:

$$q = \frac{N}{T} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N h_i} = \frac{1}{h} \quad 3-3$$

Para alguns estudos, pode ser útil definir um fluxo instantâneo,  $q_i$ , associado a cada veículo. Então:

$$q_i = \frac{1}{h_i} \quad 3-4$$

Substituindo a equação 3-2 em 3-3, para computar o fluxo em função de  $h_i$  e, posteriormente, utilizando 3-4 para computar o fluxo em função dos fluxos  $q_i$  de cada veículo, tem-se:

$$q = \frac{1}{h} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{q_i}} \quad 3-5$$

Portanto, o fluxo  $q$  é a média harmônica dos fluxos individuais  $q_i$ .

- **Ocupação ( $\theta$ )**

É definida como a fração de tempo que um determinado ponto de uma via permanece ocupado por um veículo. Experimentalmente pode ser determinada por:

$$\theta = \frac{100}{T} \sum_{i=1}^N t_i \quad 3-6$$

Onde:

$N$  = Número de veículos detectados durante o período de tempo  $T$ .

$t_i$  = Tempo durante o qual o  $i$ -ésimo veículo esteve presente no ponto considerado, ver Figura 3-1.

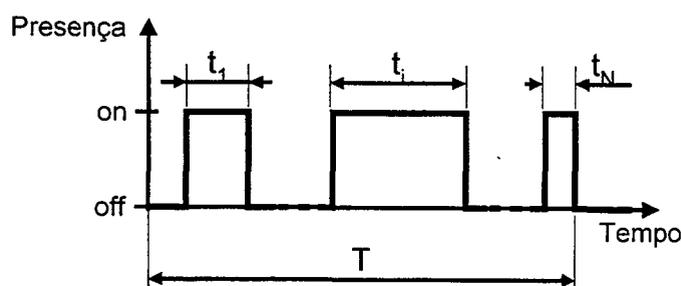


Figura 3-1

- **Velocidade**

Existem duas definições importantes de velocidades médias em engenharia de tráfego: a velocidade média temporal e a velocidade média espacial.

- **Velocidade Média Temporal ( $\bar{u}_t$ )**

Corresponde à média aritmética das velocidades observadas de vários veículos num determinado ponto:

$$\bar{u}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad 3-7$$

Onde:

$N$  = Número de observações

$u_i$  = Velocidade escalar observada do  $i$ -ésimo veículo no ponto considerado.

• *Velocidade Média Espacial ou Velocidade Média Harmônica ( $\bar{u}_s$ )*

Corresponde à média harmônica das velocidades observadas. Considere  $N$  veículos e suas respectivas velocidades observadas  $u_i$  em um ponto de uma via. A média aritmética dos tempos que cada veículo levaria para percorrer uma distância  $D$  seria dada por:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D}{u_i} \quad 3-8$$

A velocidade média espacial seria:

$$\bar{u}_s = \frac{D}{\bar{t}} = \frac{D}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{D}{u_i}} \quad 3-9$$

A expressão 3-9 dá um significado físico à esta grandeza, representando uma velocidade média baseada no tempo médio de percurso dos veículos observados. Eliminando  $D$  de 3-9, chega-se à expressão 3-10, que mostra que a velocidade média espacial  $\bar{u}_s$  é a média harmônica das velocidades  $u_i$ :

$$\bar{u}_s = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{u_i}} \quad 3-10$$

Alguns pesquisadores desenvolveram relações entre as duas velocidades médias [2]:

$$\bar{u}_t = \bar{u}_s + \frac{\sigma_s^2}{\bar{u}_s} \quad 3-11$$

$$\bar{u}_s = \bar{u}_t - \frac{\sigma_t^2}{\bar{u}_t} \quad 3-12$$

Onde:

$\sigma_s^2$  = Variância das velocidades observadas em torno da velocidade média espacial.

$\sigma_t^2$  = Variância das velocidades observadas em torno da velocidade média temporal.

Alguma consideração deve ser feita em relação à obtenção de  $u_i$ . Dois métodos utilizando detetores de presença podem ser citados: o método que utiliza um único detetor e o que utiliza dois detetores<sup>1</sup> [4] - ver Figura 3-2.

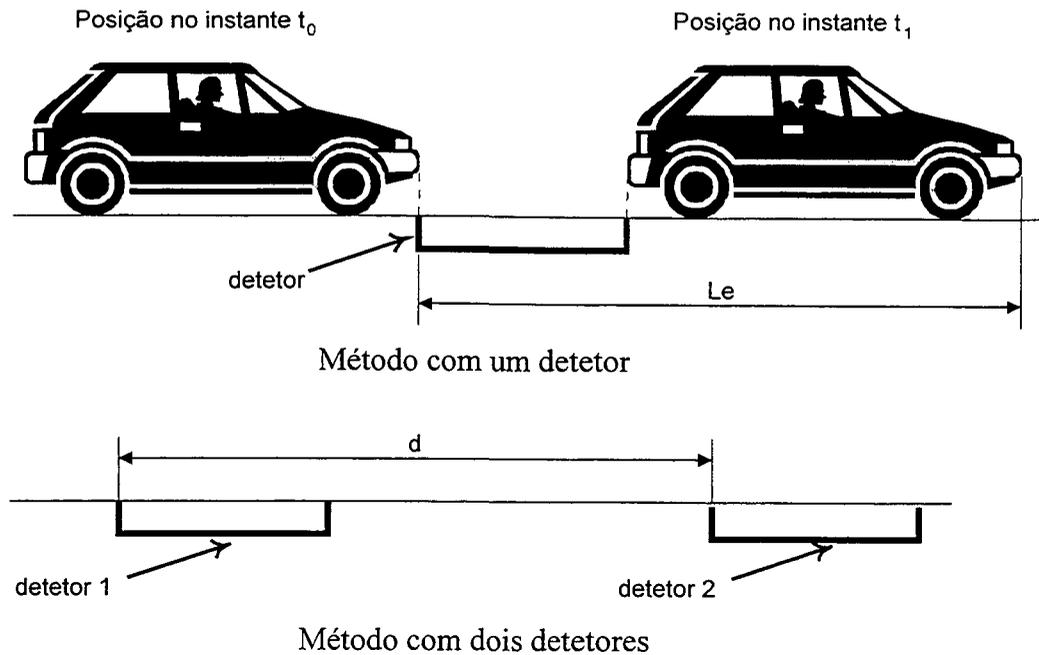


Figura 3-2

Para um detetor, a seguinte expressão é utilizada:

$$u_i = \frac{L_e}{t_1 - t_0} \tag{3-13}$$

Onde:

$L_e$  = *Comprimento efetivo do veículo*. Ou seja, é o espaço total percorrido durante o intervalo de tempo em que o detetor sente a presença de um veículo. Pelo fato das dimensões dos detetores não serem desprezíveis com relação às dimensões dos veículos, este espaço percorrido é maior do que o comprimento real dos veículos - ver Figura 3-2.

$t_0$  = Instante em que é percebida a presença do i-ésimo veículo.

$t_1$  = Instante em que é encerrada a detecção do i-ésimo veículo.

<sup>1</sup> Na literatura de língua inglesa, encontra-se os termos “*passage time method*” e “*speed trap method*” [4] respectivamente.

Para dois detetores utiliza-se:

$$u_i = \frac{d}{t_1 - t_0} \quad 3-14$$

Onde:

$d$  = Distância entre os pontos em que cada detetor muda do estado *off* para o estado *on*.

$t_0$  = Instante em que o primeiro detetor muda do estado *off* para o estado *on*, devido à passagem do  $i$ -ésimo veículo.

$t_1$  = Instante em que o segundo detetor muda do estado *off* para o estado *on* devido à passagem do  $i$ -ésimo veículo.

A expressão 3-14 pode ser melhorada com relação à precisão do resultado de medição da seguinte forma:

$$u_i = \frac{1}{2} \left( \frac{d}{t_{02} - t_{01}} + \frac{d}{t_{12} - t_{11}} \right) \quad 3-15$$

Onde:

$d$  = Distância entre pontos correspondentes dos dois detectores.

$t_{01}$  = Instante em que o primeiro detector muda do estado *off* para o estado *on*, devido a passagem do  $i$ -ésimo veículo.

$t_{02}$  = Instante em que o segundo detector muda do estado *off* para o estado *on*, devido a passagem do  $i$ -ésimo veículo.

$t_{11}$  = Instante em que o primeiro detector muda do estado *on* para o estado *off*, devido a passagem do  $i$ -ésimo veículo.

$t_{12}$  = Instante em que o segundo detector muda do estado *on* para o estado *off*, devido a passagem do  $i$ -ésimo veículo.

A configuração com dois detetores fornece resultados mais precisos do que a que utiliza um único detetor [4]. Neste último caso, deve ser assumido um *comprimento efetivo do veículo* ( $L_e$ ). Tal grandeza é bastante incerta devido a grande variedade de comprimentos dos veículos que passam numa via qualquer. Apesar disto, o uso de um único detetor é preferível quando existem restrições de custo. Para minimizar o

problema da imprecisão, faz-se periodicamente uma calibração, utilizando o resultado obtido com o método dos dois detetores como padrão. Para tanto, instala-se os dois detetores no ponto onde se deseja realizar a calibração e utiliza-se a seguinte expressão para a obtenção de  $L_e$ :

$$L_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} [(t_{11} - t_{01}) + (t_{12} - t_{02})]_i \cdot u_i \quad 3-16$$

Onde:

$N$  = Número de veículos observados

$u_i$  = Velocidade do  $i$ -ésimo veículo determinada com o uso dos dois detetores.

$t_{0j}$  = Instante em que o  $j$ -ésimo detetor percebe a presença do  $i$ -ésimo veículo

$t_{1j}$  = Instante em que o  $j$ -ésimo detetor deixa de perceber a presença do  $i$ -ésimo veículo.

O sub-índice  $i$ , nos colchetes, indica que os tempos  $t_{01}$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{02}$ ,  $t_{12}$ , são referentes ao  $i$ -ésimo veículo. O primeiro termo entre parênteses representa o tempo de passagem do veículo no primeiro detetor, e o segundo termo representa o mesmo, em relação ao segundo detetor.

#### • *Densidade*

É o número de veículos por unidade de comprimento em uma via. Pode-se definir uma densidade associada a um único veículo  $K_i$ , que algumas vezes é útil para dedução de outras grandezas, e uma densidade ao longo de um comprimento  $K$ . A densidade associada a um único veículo é definida como:

$$K_i = \frac{1}{s_i} \quad 3-17$$

Onde:

$1$  = Algarismo um, representando 1 veículo.

$s_i$  = Representa o espaço ocupado pelo  $i$ -ésimo veículo, definido como a distância entre os extremos dianteiros do  $i$ -ésimo veículo e do seu antecessor.

A densidade ao longo de um comprimento é definida como:

$$K = \frac{N}{l} \quad 3-18$$

Onde:

$l$  = Comprimento da seção ao longo da qual se deseja avaliar a densidade.

$N$  = Número de veículos contados ao longo da seção.

Através de uma foto aérea de uma via poder-se-ia determinar experimentalmente sua densidade. No entanto, tal método ainda não é prático para uso em sistemas de controle e serve apenas como ilustração da definição. A densidade pode ser estimada a partir da ocupação através da seguinte expressão:

$$K = \frac{1000 \cdot \theta}{100 \cdot L_e} \quad 3-19$$

Onde:

$K$  = Densidade em veículos/km

$L_e$  = Comprimento médio dos veículos em metros.

$\theta$  = Ocupação, em percentagem.

Sob certas condições, a utilização da expressão 3-19 pode resultar num valor subestimado para a densidade. Para ilustrar esta situação, considere um trem de veículos de mesmo tamanho  $L_r$ , igualmente espaçados de uma distância  $esp$  menor do que o comprimento do detetor. A ocupação medida por esse detetor, num determinado ponto de uma via por onde passa este trem, é de 100%. A densidade real  $K_r$ , em veículos por km, é igual a:

$$K_r = 1000 / (esp + L_r)$$

Com  $esp$  e  $L_r$  em metros. No entanto, a expressão 3-19 fornece o valor:

$$K = 1000 / L_e$$

Que é menor do que  $K_r$ , pois  $L_e$  é maior do que  $esp + L_r$  - foi visto que  $L_e$  é aproximadamente a soma do comprimento do detetor e do veículo.

A expressão 3-19 possui restrições que são consideradas nos trabalhos de Kurjian e Mikhalkin citados em [2]. Outra fonte de imprecisão desta expressão é o fato de ela utilizar o parâmetro  $L_e$ . Em vias onde circulam ônibus, caminhões e carros de passeio, isto pode levar a sérios erros. Gerlough et al [2] apresenta resultados de Weiberg, que se utiliza da propriedade que alguns detetores possuem de distinguir entre veículos altos e baixos. Fazendo-se a hipótese de que os veículos altos são os veículos longos e os veículos baixos são os de passeio, faz-se com que o sistema de medição conte separadamente os veículos longos e curtos, e aplica-se a expressão 3-20, para determinar  $K$  com mais precisão.

$$K = \frac{N_c + N_l}{N_c L_c + N_l L_l} \frac{\theta}{100} \cdot 1000 \quad 3-20$$

Onde:

$N_c$  = Número de veículos curtos

$N_l$  = Número de veículos longos

$L_c$  = Comprimento efetivo dos veículos curtos.

$L_l$  = Comprimento efetivo dos veículos longos.

$\theta$  = Ocupação

Observe que primeiro termo de 3-20 é exatamente igual a  $1/L_e$ , portanto, poder-se-ia cometer o engano de pensar que não existe diferença entre 3-19 e 3-20. Entretanto, a diferença reside no fato de que, em 3-20, o parâmetro  $L_e$  é estimado "on-line". Cada vez que se estima  $K$ , conta-se o número de veículos de cada tamanho e pondera-se o comprimento. Em 3-20,  $L_e$  é uma medida feita "off-line", congelada e utilizada nas estimativas futuras.

A densidade também pode ser estimada a partir de:

$$K = \frac{q}{u_s} \quad 3-21$$

Onde:

$q$  = Fluxo

$\bar{u}_s =$  Velocidade média espacial

Tanto a expressão 3-19 como a 3-20 estimam a densidade a partir de uma variável local,  $\theta$ . Observe ainda que a ocupação  $\theta$  é uma média da *presença* ao longo do tempo e não está associada a um instante particular. Portanto, a densidade obtida através de 3-19 pode ser entendida como uma média temporal da densidade ao longo do período usado para determinar a ocupação.

- **Tamanho de Fila**

É o número de veículos parados atrás da linha de parada de um cruzamento. Várias metodologias de controle realimentado de interseções utilizam esta grandeza para avaliar a resposta do controlador. Entretanto, não pode ser medida diretamente a partir de detetores convencionais. A referência [4] apresenta algumas soluções para estimar o tamanho de uma fila, as quais não são apresentadas aqui.

### 3.3 Conclusão

Neste capítulo fez-se uma revisão das principais variáveis que são utilizadas para descrever um sistema de tráfego e, para algumas delas, foi também visto alguns métodos de medição. Alguns dos conceitos que foram vistos, como, por exemplo, o *headway* e o fluxo, são bastante importantes para o estudo de tráfego em geral. Já conceitos como presença, ocupação e densidade, são mais relevantes quando se estuda estratégias de controle em malha fechada. A introdução destes conceitos, mesmo não sendo todos relevantes para o desenvolvimento dos futuros capítulos, foi feita por motivos didáticos.

# Capítulo 4: Modelos para Temporização e Análise de Desempenho de Interseções Isoladas Sinalizadas

---

---

## 4.1 Introdução

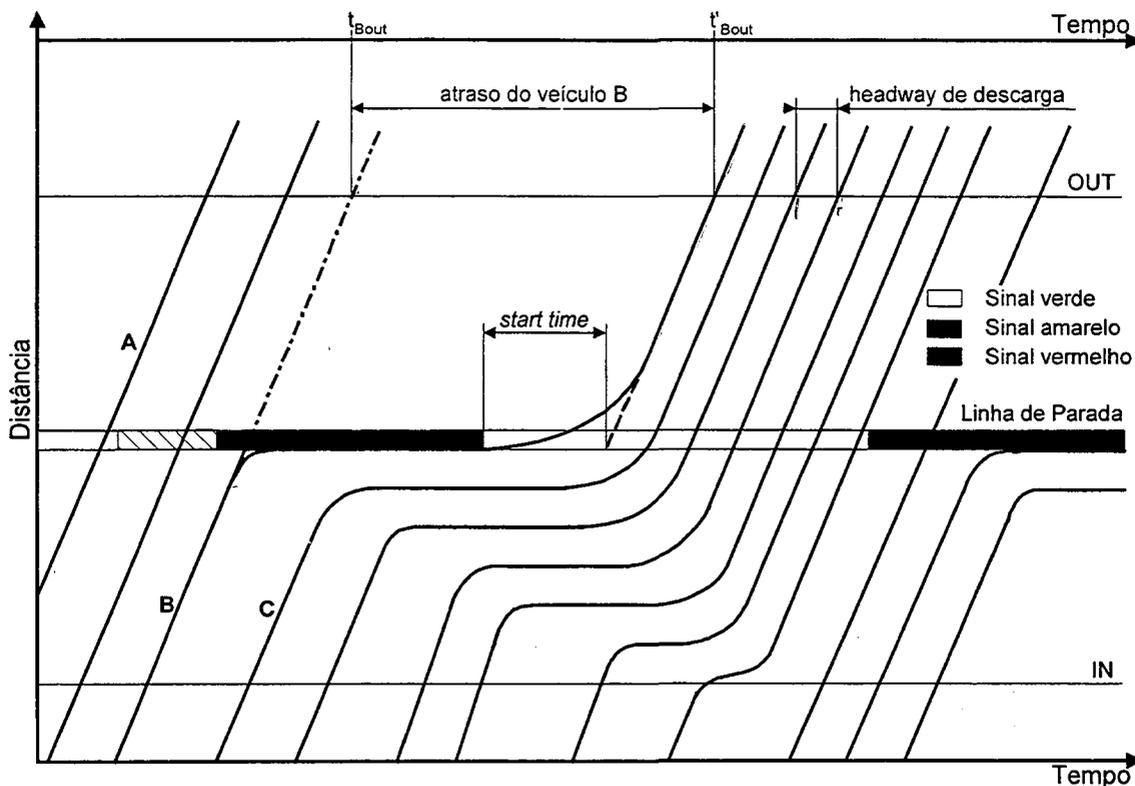
**E**ste capítulo se dedica basicamente à apresentação do modelo de Webster. Tal modelo presta-se à temporização ótima de interseções isoladas controladas por sistemas pré-temporizados. O modelo também pode ser usado no sentido inverso, ou seja, dado um conjunto de variáveis de temporização previamente selecionado e mais outras variáveis que caracterizam o tráfego, pode-se determinar o atraso médio dos veículos que utilizam a interseção.

Vários pesquisadores realizaram trabalhos na direção da determinação do atraso em interseções, entre eles Webster (1958) [1] e Uematu (1958) [3]. O caminho trilhado por Webster e por vários outros pesquisadores foi o de tentar estabelecer uma relação matemática entre o atraso, as variáveis de temporização do controlador, a demanda de tráfego e ainda o fluxo de saturação na região da interseção. Os modelos mais comentados na literatura para estabelecer esta relação são: os baseados em teoria de filas [2], [3] e [5], os modelos que fazem analogia entre o fluxo de veículos numa pista e o escoamento de fluidos [2] e [3] e os modelos de simulação [1], [2], [3], [4] e [5]. A partir desta relação, manipulações matemáticas podem ser feitas para se chegar às variáveis ótimas de temporização. No caso dos modelos de simulação, uma varredura nos parâmetros de controle, para uma dada demanda, pode revelar o conjunto de parâmetros de temporização que leva ao mínimo atraso médio por veículo.

Entre os modelos propostos pelos pesquisadores ao longo do tempo, talvez o mais bem aceito e explorado tenha sido o de Webster. Além da fórmula de Webster, apresenta-se neste capítulo um modelo básico preliminar e conceitos que são importantes para a modelagem e análise de todos os outros tipos de interseções e sistemas de controle, além das interseções isoladas com temporização fixa.

## 4.2 Modelo de Comportamento em Uma Interseção Isolada

A Figura 4-1 apresenta um diagrama de distância por tempo para vários veículos que chegam a uma interseção sinalizada, representando um modelo idealizado do comportamento do tráfego neste tipo de interseção.



**Figura 4-1 - Modelo idealizado de comportamento do tráfego em um cruzamento isolado.**

O veículo A chega à interseção quando o sinal está verde, passando sem sofrer atraso. O veículo B chega quando o sinal está vermelho e, a uma certa distância, começa a desacelerar até parar na linha de parada. O veículo C também chega quando o sinal está vermelho e desacelera até parar a uma certa distância atrás do veículo B. Outros veículos chegam também durante o vermelho e param uns atrás dos outros, acumulando-se numa fila, conforme a ordem de chegada. Alguns veículos chegam durante o verde, mas também precisam parar na fila que ainda está sendo descarregada, enquanto que outros passam sem atraso, pois chegam quando não existe mais fila. Quando o condutor do veículo B percebe a luz verde, ele começa a acelerar até atingir a velocidade normal de circulação. O condutor do veículo C, ao perceber que o veículo B partiu e já está a uma distância segura, começa também a acelerar até

a velocidade normal de circulação. O mesmo se repete para os outros veículos da fila, processando-se assim a sua descarga.

#### 4.2.1 Fluxo de Saturação (s) e Taxa de Descarga

O fluxo de saturação é a máxima taxa segundo a qual os veículos podem circular numa determinada faixa de uma pista. No estudo de modelos para avaliação do atraso de veículos numa interseção, o fluxo de saturação representa um papel importante, pois a taxa de descarga das filas formadas em uma faixa de pista se faz à máxima taxa possível, uma vez que todos os condutores de veículos querem perder o mínimo do seu tempo na fila.

Posição na Fila	<i>Headway</i> Observado em s	<i>Headway</i> em Regime em s	Tempo Adicionado devido ao Transiente em s
1	3.8	2.1	1.7
2	3.1	2.1	1.0
3	2.7	2.1	0.6
4	2.4	2.1	0.3
5	2.2	2.1	0.1
6 em diante	2.1	2.1	0.0

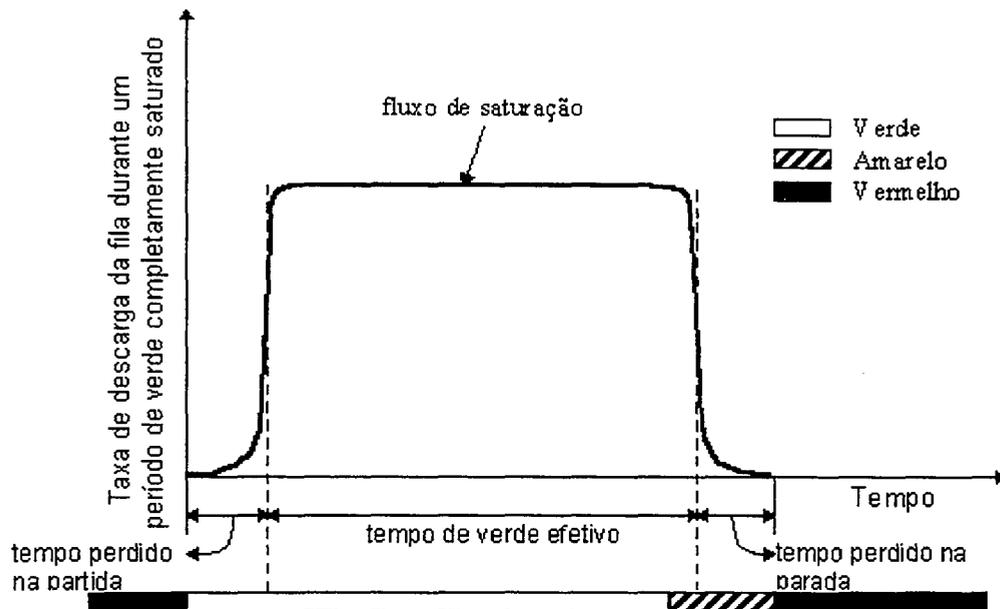
*start time = 3,7s*

**Tabela 4-1 - Dados experimentais dos *headways* de descarga [4].**

A Tabela 4-1, extraída de [4], mostra dados experimentais dos *headways* durante a descarga de uma fila. Pode-se notar que os *headways* associados aos primeiros veículos são maiores e, a partir do sexto veículo, os *headways* se repetem, ou entram em regime. Pode-se entender qualitativamente as razões pelas quais os primeiros *headways* são maiores, pois, antes de ser dado o sinal verde, todos os veículos da fila estão parados. O condutor do primeiro veículo pode perder um tempo até perceber a mudança do sinal, depois tem um tempo de reação e talvez até uma troca de marcha. Seu veículo é acelerado de zero até a velocidade normal de circulação. Os próximos veículos vão perdendo cada vez menos tempo, pois já perceberam a mudança de sinal, já estão prontos para acelerar ou até já estão em movimento lento e, depois de mais algum tempo, a própria fila já começa a deslocar-se em bloco de veículos.

O mesmo comportamento descrito no parágrafo anterior pode ser colocado em termos de taxa de descarga ou fluxo. A taxa de descarga de uma fila passa por um transiente

inicial, onde é menor, e cresce até atingir um valor constante. A taxa de descarga volta a cair no fim do sinal amarelo, o que pode ser visto na Figura 4-2. Essa taxa de descarga constante da fila, atingida alguns segundos após o início do verde, corresponde ao que se chama de *fluxo de saturação*.



**Figura 4-2 - Comportamento no início e final do verde**

Na Figura 4-1, o transiente da taxa de descarga e, conseqüentemente, dos *headways* de descarga não estão representados. Como foi dito anteriormente, aquele é um modelo idealizado e serve ao propósito do cálculo do atraso. Para fins do cálculo do atraso, faz-se a hipótese de que a taxa de descarga é constante e igual ao fluxo de saturação durante todo o tempo em que os veículos se movimentam através da interseção. Os efeitos sobre o atraso provenientes do transiente da taxa de descarga no início e no fim da fase não são desprezados. São levados em consideração através de outras variáveis do modelo, a saber, o tempo perdido, que será visto na seção seguinte.

O que foi dito até o momento sobre fluxo de saturação e taxa de descarga é o suficiente para promover o entendimento do modelo de Webster no que se refere a estes parâmetros. Os próximos parágrafos aprofundam a discussão sobre fluxo de saturação e estão presentes para fins de enriquecimento do texto.

A Tabela 4-2 abaixo mostra a relação entre fluxo de saturação e a largura da aproximação de uma pista. Estes são resultados obtidos de experimentos sob condições controladas e extraídos de [1]. Nas faixas analisadas não haviam veículos

estacionados no acostamento e nem curvas. Os resultados são apresentados em termos de p.c.u./h<sup>1</sup>.

Largura da Aproximação (w) em metros	Fluxo de saturação (s) em p.c.u./h
3.0	1675
3.3	1700
3.6	1725
3.9	1775
4.2	1875
4.5	2025
4.8	2250
5.2	2450
5,2<w<18,3	s = 525w

**Tabela 4-2 - Fluxo de saturação em função da largura da aproximação [1].**

Os experimentos em condições controladas mostraram que a relação é linear de 5,2m até 18,3m. Observa-se que o fluxo de saturação tem muita relação com o sentimento de segurança que os motoristas possuem. Se presentem um potencial para ocorrência de acidente, tendem a reduzir a velocidade e a aumentar a distância entre o seu veículo e o veículo à sua frente.

O fluxo de saturação também é uma função de outros fatores, como, por exemplo, a composição do tráfego e a direção dos movimentos. A composição do tráfego se refere ao percentual de ônibus, veículos de passeio, motos, caminhões, etc., que compõe o tráfego. A direção dos movimentos se refere à geometria das ruas - curvas e retas.

O fluxo de saturação é avaliado para cada faixa que compõe uma pista. Ashton (1996) [3] define fluxo de saturação de uma faixa de rua que chega a uma interseção como sendo o fluxo que seria formado se houvesse uma fila infinita nesta faixa e a ela fosse dado um sinal verde durante um tempo muito longo. Esta definição é mais apropriada para interseções isoladas. Para entender esta ressalva, imagine que após a interseção

<sup>1</sup> A unidade p.c.u é muito utilizada em tráfego e significa *passenger-car units*. Um p.c.u. é equivalente a um veículo leve de passeio.

exista uma restrição que torna o fluxo de saturação neste ponto menor do que aquele no local da interseção. Se for dado um verde muito grande para uma fila infinita na interseção, chegará um determinado momento em que o espaço entre o ponto restringido e a interseção será totalmente preenchido por veículos e, neste momento, o fluxo de saturação da interseção se tornará igual ao fluxo de saturação no ponto restringido. Portanto, o fluxo de saturação na interseção, que ocorre em condições operacionais nas quais o verde não é infinito, não seria corretamente avaliado. Deste exemplo, conclui-se que o fluxo de saturação não pode ser visto em termos absolutos como dependendo apenas de características como largura de rua, velocidade e questões de segurança pontuais, mas também de condições operacionais, como tempo de verde efetivo e condições de tráfego nas vizinhanças da interseção.

Apesar do fluxo de saturação variar entre um ciclo e outro de acordo com as condições do tráfego, Webster considerou o fluxo de saturação como uma constante em seu modelo. Ainda assim, na comparação final de seus resultados com medições em campo, concluiu que suas hipóteses levaram a resultados bastante satisfatórios.

#### 4.2.2 Tempo Perdido (I)

O tempo total perdido durante uma fase (I) é composto pelo tempo perdido no início da fase (*start time*) mais o tempo perdido no final da fase, durante o sinal amarelo - ver Figura 4-2. O *start time* é o tempo perdido na arrancada dos veículos quando a luz verde se acende. É composto basicamente pelo tempo de reação dos motoristas mais o tempo necessário para acelerar os veículos até a velocidade normal de circulação. A Tabela 4-1 mostra que o *start time* está associado aos primeiros veículos. A contribuição de um veículo para o *start time* é a diferença entre o *headway* observado associado a este veículo e o *headway* de regime permanente. Esta contribuição é maior para veículos cuja relação entre peso e potência é maior, como ônibus, caminhões e veículos de baixa cilindrada. O *start time* é a soma das contribuições individuais de cada veículo, como pode ser visto na referida tabela.

Se ainda existem veículos na fila quando o sinal verde termina, eles usam o sinal amarelo para atravessar a interseção. No entanto, a taxa de descarga durante o sinal amarelo é menor do que a taxa de descarga durante o sinal verde [1]. A Figura 4-2 ilustra o fato de que a taxa de descarga é menor no início e no final da fase e que existe um tempo que não é aproveitado. Mesmo que não exista nenhum veículo no fim do verde, os veículos que chegam durante o amarelo também não o aproveitam completamente por questões de segurança. O fato de a taxa de descarga ser menor no

início e no fim da fase é levado em consideração, no modelo de cálculo, através do tempo perdido (l). O valor desta variável é computado como sendo uma redução do tempo de movimento efetivo dos veículos, sem estar relacionado a nenhum veículo em particular.

Na Figura 4-1, pode-se ver o significado do *start time*. Após o início do verde, o primeiro veículo permanece parado por um tempo igual ao *start time*. Só depois de vencido este tempo, o primeiro veículo parte instantaneamente com uma velocidade igual à velocidade normal de circulação (linha tracejada). O tempo perdido no fim do amarelo não está representado nesta figura, mas é levado em conta através da redução do tempo de movimento efetivo.

#### ***4.2.3 Tempo de Verde (k), Tempo de Verde Líquido e Tempo de Verde Efetivo (g)***

O tempo durante o qual a luz verde de um semáforo fica acesa será referido apenas como *tempo de verde (k)*, enquanto que o termo *verde líquido* corresponde ao intervalo de tempo de verde efetivamente aproveitado pelos veículos para se movimentarem através de uma interseção. É igual ao tempo de verde subtraído do *start time*. O termo *tempo de verde efetivo (g)* refere-se ao tempo total efetivamente aproveitado pelos veículos. É avaliado como sendo a soma do tempo de verde e amarelo (a) subtraído do tempo perdido total:

$$g = k + a - l$$

4-1

Talvez um nome mais adequado para o verde efetivo fosse *tempo de movimento efetivo*. No entanto, a literatura de língua inglesa adota *effective green time* e, por isso, aqui mantém-se o termo *tempo de verde efetivo*.

Estas variáveis aparecem tanto para uma fase particular quanto para representar uma variável global referente ao ciclo completo. Por exemplo, às vezes fala-se em tempo de verde efetivo de uma fase, que é o tempo de verde efetivo dado aos veículos que se movimentam durante esta fase, ou pode-se falar em tempo de verde efetivo total, que é a soma dos tempos de verde efetivo de todas as fases. Cada referência estará clara pelo contexto ou por citação explícita.

Aproveita-se este tópico para falar sobre a composição da fase e do ciclo. Da definição de fase e do exposto acima, conclui-se que uma fase é igual a  $k+a$  ou  $g+l$ . Deve-se

lembrar que a fase é o tempo total que é dado a um determinado grupo de movimentos para que estes possam cruzar a interseção. Apesar de o tempo  $I$  não ser utilizado,  $I$  faz parte do tempo no qual a luz do semáforo fica verde e amarela, portanto, os veículos têm o direito de passagem pela interseção, se não o fazem, é por limitação do próprio sistema de tráfego. O ciclo, por sua vez, é computado como  $\sum_{i=1}^n (\text{fase}_i + R_i)$ . Onde  $n$  é o número de fases e  $R_i$  é o vermelho de segurança que segue cada fase.

#### 4.2.4 Atraso ( $d$ )

Na Figura 4-1, o prolongamento da curva do veículo B, que está impresso em linha traço-ponto, corresponde à trajetória que seria registrada caso a interseção não existisse. Neste caso, o veículo passaria pelo ponto OUT no instante  $t_{\text{Bout}}$ . Como a interseção existe, ele passa no instante  $t'_{\text{Bout}}$ . Portanto, o atraso do veículo B, devido à interseção, corresponde a  $t'_{\text{Bout}} - t_{\text{Bout}}$ . O mesmo é válido para os outros veículos.

Concluindo o que foi dito em relação aos parâmetros fluxo de saturação, tempo perdido e verde efetivo, o que interessa, para o cálculo do atraso, em última análise, é que o número médio de veículos que são descarregados de uma fila durante o período de verde esteja corretamente computado [1]. Portanto, deve-se determinar estes parâmetros de forma a que o produto  $s \cdot g$  resulte no número correto de veículos que podem ser descarregados durante um período de verde completamente saturado<sup>2</sup>. Onde  $s$  é o fluxo de saturação, representando a taxa de descarga, e  $g$  é o tempo de verde efetivo.

#### 4.2.5 Grau de Saturação ( $x$ )

O grau de saturação ( $x$ ) pode ser definido como a relação entre o número médio de veículos que chegam ao cruzamento durante um ciclo através de uma faixa e o número máximo de veículos que podem ser atendidos pelo cruzamento através desta faixa durante um ciclo. Portanto, se o grau de saturação for maior que um, significa que chegam mais veículos do que podem ser atendidos naquela faixa. Se esta situação durar por muito tempo, as filas crescem e diz-se que o sistema está saturado.

O percentual de verde efetivo ( $\lambda$ ) que é atribuído a uma faixa de uma pista é definido como:

---

<sup>2</sup> Período de verde que não é suficiente para dar vazão à todos os veículos da fila.

$$\lambda = \frac{g}{C} \quad 4-2$$

Onde  $C$  é o ciclo e  $g$  é o verde efetivo. Da definição de *grau de saturação* e de 4-2, pode-se chegar a:

$$x = \frac{\text{n}^\circ \text{ veic. que chegam na fila}}{\text{n}^\circ \text{ max. de veic. atendidos.}} = \frac{Cq}{gs} = \frac{Cq}{\lambda Cs} = \frac{q}{\lambda s} \quad 4-3$$

Onde  $q$  é demanda e  $s$  é o fluxo de saturação da faixa considerada.

### 4.3 Fórmula de Webster para o Atrazo

Uma das mais bem conhecidas e utilizadas fórmulas para o atrazo em interseções foi obtida por Webster [1], derivada de desenvolvimentos teóricos, empíricos, simulação e observações de campo.

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{C}{q^2} \right)^{1/3} x^{(2+5\lambda)} \quad 4-4$$

A fórmula completa de Webster (equação 4-4) foi utilizada em vários trabalhos como padrão para avaliação de outros modelos de atrazo [2]. Se aplica a veículos chegando ao acaso em interseções sinalizadas isoladas controladas por sistemas de ciclo fixo [3]. A equação 4-4 fornece o atrazo médio por veículo para uma única faixa de rua que chega a uma interseção. As variáveis que aparecem na expressão 4-4 são assim definidas:

$d$  = Atrazo médio (segundos/veículo);

$C$  = ciclo (segundos);

$q$  = fluxo observado (v.p.s.);

$\lambda$  = proporção do ciclo efetivamente aproveitada pelos veículos para se movimentarem através da interseção;

$x$  = grau de saturação.

As variáveis  $q$ ,  $\lambda$  e  $x$ , são referentes à faixa para a qual está sendo calculado o atraso  $d$ .

O primeiro termo da equação 4-4 é o mesmo obtido por modelos que fazem analogia com sistemas de fluidos, supondo fluxo contínuo[2]. Pode ser demonstrado que o segundo termo da equação é obtido por um modelo de filas, admitindo que o tempo entre chegadas segue uma distribuição exponencial e que a partida se faz sob uma taxa determinística e constante igual a  $1/\lambda s$ . O mesmo introduz o efeito randômico. O terceiro é um termo de correção desenvolvido por Webster a partir da análise de regressão de dados gerados em simulação, e representa entre 5% e 15% do atraso médio total calculado por 4-4. Uma aproximação da fórmula original é frequentemente utilizada buscando uma simplificação dos cálculos através da eliminação do terceiro termo:

$$d = \frac{9}{10} \left[ \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] \quad 4-5$$

A Figura 4-3, a seguir, apresenta o resultado gráfico da equação 4-4, quando o atraso médio por veículo para uma faixa de uma pista é plotado contra o fluxo  $q$ , para um fluxo de saturação de 1800 v.p.h. e um percentual de verde efetivo de 50%. Observa-se que o atraso tende ao infinito quando o fluxo ultrapassa um certo limite, independentemente do tamanho do ciclo.

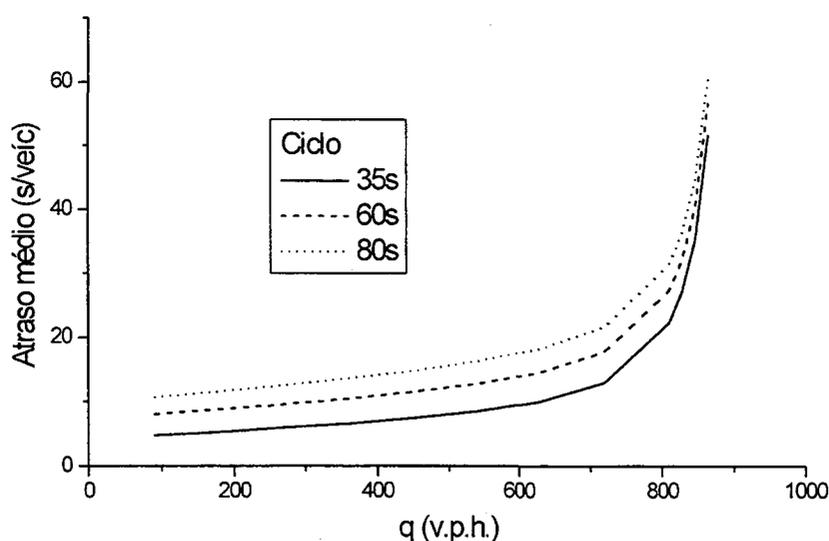


Figura 4-3 - Atraso médio dos veículos de uma faixa para a qual  $\lambda=0,5$  e  $s=1800$ v.p.h.

### 4.4 Temporização para Sistemas de Ciclo Fixo

Temporizar um sistema de semáforos que opera com ciclo fixo significa determinar basicamente dois fatores: o ciclo que fornece o mínimo atraso e a divisão deste ciclo entre as diversas fases (*split*). No caso de sistemas arteriais e em rede, o *offset* e as políticas de coordenação também devem ser determinados. No entanto, este tema não é abordado neste trabalho.

#### 4.4.1 Split

As primeiras sugestões para estabelecer o tempo de sinal verde dos semáforos diziam que o tempo de verde efetivo total da interseção deveria ser dividido, para cada fase *i*, na proporção da máxima taxa de ocupação  $Y_i$ , que é a relação entre o fluxo observado *q* e o fluxo de saturação *s* de cada faixa de rua. Ou seja, calcula-se a taxa de ocupação  $y_{ij}$  da *j*-ésima faixa de rua pertencente ao *i*-ésimo grupo de movimentos que serão separados no tempo. Seleciona-se a maior taxa de ocupação dentro de cada grupo de movimentos e distribui-se o tempo total de verde efetivo para cada fase na proporção destas máximas relações encontradas:

$$Y_i = \max_j (y_{ij})$$

4-6

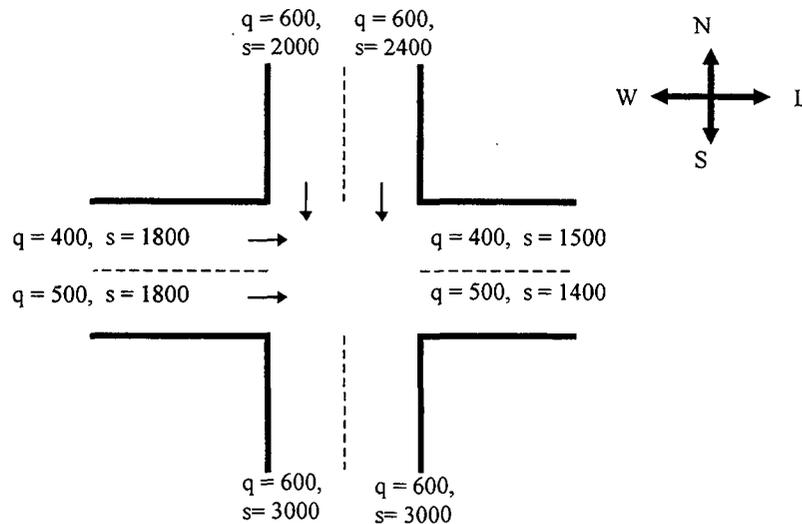


Figura 4-4 - Exemplo para o cálculo do *split*

A faixa de cada grupo de movimento que possui o maior  $y_{ij}$  é chamada de *faixa crítica* do grupo. Se os valores de fluxo observado ( $q$ ) e fluxo de saturação ( $s$ ) fossem dados para uma interseção, como ilustrada na Figura 4-4, a proporção correta para os tempos de verde efetivo de cada fase seria encontrada como segue:

Para o movimento N-S as relações  $q/s$  são:

$$y_{11} = 600/2000 = 0.30$$

$$y_{12} = 600/2400 = 0.25$$

$$y_{13} = 600/3000 = 0.20$$

$$y_{14} = 600/3000 = 0.20$$

$$Y_1 = \max(y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}) = 0.30$$

Para o movimento W-L :

$$y_{21} = 400/1800 = 0.22$$

$$y_{22} = 500/1800 = 0.28$$

$$y_{23} = 400/1500 = 0.27$$

$$y_{24} = 500/1400 = 0.36$$

$$Y_2 = \max(y_{21}, y_{22}, y_{23}, y_{24}) = 0.36$$

Portanto, o tempo de verde efetivo deverá ser dividido na proporção de 0.30/0.36 para os movimentos N-S e W-L. Observe que, apesar dos fluxos observados nos movimentos da direção N-S serem maiores do que os da W-L, os movimentos W-L recebem a maior fatia de tempo de verde efetivo. Isso porque a variável que interessa é  $q/s$  e não simplesmente  $q$ .

Alguns estudos realizados por Webster [1] e por outros pesquisadores demonstraram que o melhor *split* difere um pouco do obtido pelo método descrito acima. No entanto, a diferença é mínima, não justificando o maior esforço empregado num método mais elaborado.

Dados o número de fases  $n$ , o tempo de vermelho de segurança por fase  $R$  e o tempo perdido por fase  $l$ , o tempo total  $L$  perdido durante um ciclo é dado por:

$$L = n(l + R)$$

O verde efetivo total para o ciclo ( $g$ ) torna-se:

$$g = C - L \quad 4-8$$

Para determinar o tempo de verde efetivo para uma fase  $i$  ( $g_i$ ) faz-se:

$$g_i = g \frac{Y_i}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad 4-9$$

Finalmente, pode-se determinar o tempo de verde associado a cada fase ( $k_i$ ) através da equação 4-1, rescrita como:

$$k_i = g_i - a_i + l \quad 4-10$$

#### 4.4.2 Ciclo Ótimo

Webster utilizou a equação 4-5 com modificações para chegar a equação:

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n Y_i} \quad 4-11$$

As unidades de  $C$  e  $L$  são em segundos. Esta expressão fornece o comprimento de ciclo que leva ao mínimo atraso total por veículo para interseções isoladas sinalizadas e pré-temporizadas. Para chegar até ela, a equação 4-5 foi manipulada para obter uma expressão para o atraso total médio de todos os veículos que cruzam a interseção. Em seguida, a equação resultante foi minimizada em relação ao ciclo.

### 4.5 Capacidade

A capacidade de um cruzamento operando com um determinado sistema de controle ajustado com determinados parâmetros de operação é definida como a quantidade máxima de veículos que pode utilizar o cruzamento na unidade de tempo. Observe que, quanto menor é o número de mudanças de fase dentro de um determinado

período de tempo, maior é a capacidade da interseção, pois, quando ocorre a mudança de uma fase para outra, perde-se um tempo (**I+R**), durante o qual a interseção não é utilizada. Portanto, para ciclos maiores, a fração de tempo total perdido  $L/C$  é menor e, conseqüentemente, a capacidade é maior. Pode-se fazer uma analogia com sistemas de produção, onde o tempo não aproveitado (**I+R**) pode ser comparado ao *tempo de setup* das máquinas para troca de ferramentas, de programas CNC, etc, que ocorre quando se muda o tipo de peça que vai ser trabalhada pela máquina. Geralmente, nestes casos, prolonga-se ao máximo a fabricação de um único tipo de peça, evitando as alternâncias e, conseqüentemente, diminuindo-se os tempos mortos.

A capacidade é outra medida de desempenho para interseções. O material a seguir apresenta uma formulação para a capacidade desenvolvida pelo Instituto de Transporte do Texas e extraído de [4]. Posteriormente, faz-se uma outra proposta para o cálculo da capacidade.

Considere uma faixa de uma pista em um cruzamento. Considere a faixa de onde os veículos se originam, ao invés da faixa destino. Seja  $n_{Ci}$  o número máximo de veículos que circulam nesta faixa e que podem atravessar o cruzamento durante o sinal verde, então:

$$n_{Ci} = \frac{k_i - D_i}{h_i} + 2 \tag{4-12}$$

Onde:

$k_i$  = Tempo de verde para a faixa considerada;

$D_i$  = Tempo requerido para os dois primeiros veículos serem atendidos pela interseção.

$h_i$  = *Headway* médio para os veículos, a partir do terceiro.

A expressão 4-12 estabelece que, depois que os dois primeiros veículos foram atendidos, gastando para isto um tempo  $D_i$ , os veículos restantes são atendidos a uma taxa constante igual a  $h_i$ . Além disto, considera que os veículos são atendidos apenas durante o tempo de verde. O tempo amarelo não é aproveitado. Fazendo  $D_i = 5,8s$  e  $h_i = 2,0s$ , segue:

$$n_{Ci} = \frac{k_i - 5,8}{2,0} + 2 = \frac{k_i - 1,8}{2,0} \tag{4-13}$$

A expressão 4-13 estabelece que, se for considerado um atraso de 1,8s antes que o *headway* para o primeiro veículo comece a ser cronometrado, o número de veículos ( $n_{ci}$ ) permanece o mesmo que se fosse considerado os dois primeiros veículos sendo atendidos com taxas diferentes dos demais.

Multiplicando 4-13 pelo número de ciclos por hora ( $3600/C$ , com  $C$  dado em segundos), chega-se ao número de veículos por hora para uma faixa ( $n_{hi}$ ):

$$n_{hi} = \frac{k_i - 1,8}{2,0} \left( \frac{3600}{C} \right) \text{ (veículos/hora)} \quad 4-14$$

Considerando que as hipóteses até aqui mencionadas são válidas para as faixas críticas de cada fase, então a soma das capacidades das faixas críticas de todas as  $n$  fases é dada por:

$$N_h = \sum_{i=1}^n n_{hi} = \sum_{i=1}^n \frac{k_i - 1,8}{2,0} \left( \frac{3600}{C} \right) = \frac{1800}{C} \left( \sum_{i=1}^n k_i - n \cdot 1,8 \right) \quad 4-15$$

O ciclo pode ser escrito como:

$$C = \sum_{i=1}^n k_i + n \cdot a \quad 4-16$$

Neste caso, o tempo de amarelo  $a$  é considerado igual para todas as fases.

$$\sum_{i=1}^n k_i = C - n \cdot a \quad 4-17$$

Substituindo 4-17 em 4-15, segue:

$$N_h = 1800 - \frac{1800n}{C} (a + 1,8) \quad 4-18$$

Fazendo  $a = 3,0s$ , segue:

$$N_h = 1800 - \frac{8640n}{C} \quad 4-19$$

A expressão 4-19 fornece a soma das capacidades das faixas críticas de um cruzamento. Esse resultado é interessante porque esclarece o comportamento da

capacidade em função do ciclo. Observe que, no limite, quando  $C$  tende ao infinito, a capacidade tende ao fluxo de saturação (1800 v.p.h.), o que é razoável, visto que o fluxo de saturação é o máximo fluxo que pode ser observado. As hipóteses embutidas podem ser resumidas em:

- O tempo de amarelo não é aproveitado;
- Os tempos de amarelo de todas as fases são iguais a 3,0s;
- O tempo que se passa do início do sinal verde até o atendimento do primeiro veículo é igual a 1,8s + 2,0s para as faixas críticas de todas as fases;
- O *headway* médio de descarga é igual a 2,0s para as faixas críticas de todas as fases;

Seguindo o mesmo raciocínio, pode-se desenvolver uma expressão mais flexível para a capacidade. A palavra flexível quer dizer “menos limitada por hipóteses”.

$$n_{ci} = \frac{g_i \cdot s}{3600} \text{ (veículos/ciclo)} \quad 4-20$$

Onde:

$g_i$  = tempo de verde efetivo para uma faixa contemplada pela fase  $i$  (s);

$s$  = fluxo de saturação (v.p.h.)

Multiplicando-se 4-20 pelo número de ciclos por hora ( $3600/C$ , com  $C$  dado em segundos) segue:

$$n_{hi} = \frac{g_i \cdot s}{C} \text{ (veículos/hora)} \quad 4-21$$

$$N_h = \sum_{i=1}^n \frac{g_i \cdot s}{C} = \frac{s}{C} \sum_{i=1}^n g_i \quad 4-22$$

$$\sum_{i=1}^n g_i = C - n \cdot (I + R) \quad 4-23$$

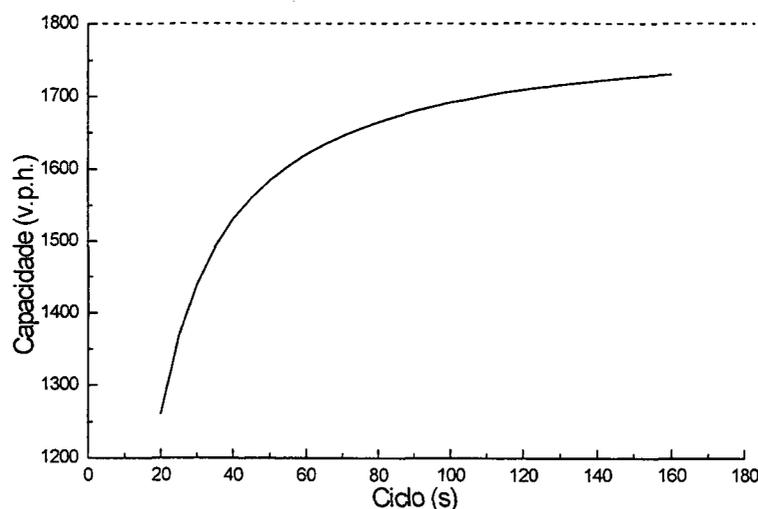
$$N_h = s - \frac{ns(I + R)}{C} \quad 4-24$$

A expressão 4-24 fornece a soma das capacidades de quaisquer  $n$  faixas críticas das  $n$  fases que atendam as seguintes hipóteses.

- Fluxo de saturação igual a  $s$ ;
- Tempo perdido igual a  $l$ ;
- Tempo de vermelho de segurança igual a  $R$ .

Estes valores devem ser iguais para todas as  $n$  faixas críticas. Para se obter a capacidade total da interseção, ou seja, de todas as faixas, inclusive sem a restrição de que os parâmetros sejam iguais para todas elas, pode-se calcular a capacidade individual de cada faixa, com a expressão 4-21, e somar os resultados para obter a capacidade total da interseção. As expressões 4-21 e 4-24 consideram que os veículos aproveitam os tempos de verde e de amarelo.

A Figura 4-5 plota os resultados da expressão 4-24. Nota-se que a taxa de crescimento da capacidade em função do ciclo é decrescente. A partir de certos valores de ciclo ( $\approx 120$ s), o aumento da capacidade já não é mais significativo.



**Figura 4-5 - Capacidade das faixas críticas em função do ciclo.  $l+R=3$ s/fase,  $n=2$ ,  $s=1800$  v.p.h.**

## 4.6 Conclusão

O material apresentado neste capítulo é parte dos resultados clássicos da teoria de tráfego e foram extraídos de textos bem conhecidos [1], [2], [3], [4] e [5]. Alguns comentários e esclarecimentos de interesse didático foram introduzidos pelo autor desta dissertação, bem como a dedução da expressão 4-24. A fórmula de Webster,

equação 4-4, foi introduzida sem informações mais detalhadas sobre suas hipóteses. Estas informações são passadas com mais detalhes no capítulo 5. Aliás, estas hipóteses podem ser consideradas uma informação relativamente rara, pois, dos textos estudados, só o artigo original de Webster [1] traz em detalhes as hipóteses embutidas na equação 4-4, embora todos os textos mencionem a fórmula. A propósito, em [1], Webster não faz uma dedução formal desta equação, nem do segundo termo, que Gerlough et al [2] afirma poder ser deduzido a partir de teoria de filas.

Além do atraso e da capacidade, que são medidas de desempenho para cruzamentos, foram introduzidos outros conceitos que estão diretamente relacionados à modelagem e caracterização do tráfego. O fluxo de saturação e o tempo perdido são alguns destes conceitos. Os elementos apresentados são básicos para o entendimento e construção de modelos mais complexos e são bastante utilizados para o desenvolvimento dos capítulos subsequentes.

# Capítulo 5: Modelo de Simulação e Validação do Modelo

---

---

## 5.1 Introdução

**E**ste capítulo trata principalmente da apresentação do modelo conceitual de simulação de tráfego desenvolvido, bem como de sua validação. O modelo, que será identificado como MSCI<sup>1</sup>, simula um cruzamento isolado que pode ser controlado por qualquer tipo de sistema. Neste capítulo, apresenta-se a versão controlada por um sistema convencional pré-temporizado. No capítulo seguinte, o cruzamento é controlado por um controlador em malha fechada. O modelo é validado utilizando-se os resultados gerados pela fórmula de Webster (equação 4-4) cujo valor é amplamente reconhecido. Aproveita-se também as hipóteses de Webster [1] para a construção do MSCI.

Comenta-se, na seção 5.4, a respeito da ferramenta utilizada para a construção do MSCI, bem como alguns detalhes sobre o tratamento estatístico dos resultados.

## 5.2 Objetivos da Simulação

No capítulo 4, foi apresentado o modelo de Webster que serve para avaliar o desempenho e temporizar cruzamentos controlados por sistemas de semáforos que operam com ciclo fixo. A fórmula de Webster (equação 4-4) é de pouca utilidade no projeto de sistemas de controle do tipo malha fechada, que serão vistos no capítulo 6, e os sistemas maiores do tipo Rede Fechada. Estes sistemas não satisfazem às hipóteses da referida equação. Nestes casos, a utilização de modelos analíticos torna-se bastante complicada e, em certos casos, até mesmo impossível. Uma abordagem para a solução deste problema, portanto, é recorrer à simulação numérica.

O objetivo do modelo MSCI é servir como uma base confiável para testar políticas e estratégias de controle para interseções isoladas. Além disto, sua base pode ser

---

<sup>1</sup> Modelo de Simulação para Cruzamentos Isolados

utilizada para o desenvolvimento de modelos mais complexos, como, por exemplo, sistemas Arteriais e em Rede Fechada.

Deseja-se particularmente que o MSCI, entre outras habilidades:

- Forneça o atraso médio por veículo para cada faixa de pista;
- Permita testar diversos controladores de interseções isoladas;
- Permita testar várias distribuições de chegada de veículos;
- Permita testar vários parâmetros de tráfego e do controlador.

Além destas, o modelo desenvolvido possui outras características desejáveis em um modelo de simulação. Várias destas características se devem à própria plataforma de desenvolvimento que será comentada adiante.

### 5.3 Modelo de Simulação

Nesta seção, descrevem-se as hipóteses referentes ao tráfego utilizadas na construção do MSCI. No capítulo 4, onde foi apresentada a fórmula de Webster, comentou-se que ela é consequência de um trabalho com aspectos teóricos, de simulação e empíricos. Os dois primeiros termos da equação 4-4 foram obtidos a partir de considerações teóricas. O terceiro termo é uma correção que, adicionada aos dois primeiros, ajusta a resposta para coincidir com os resultados de simulação. Portanto, em última análise, a referida equação gera os resultados das simulações de Webster. Posteriormente, ele compara esse resultado com observações de campo para validá-lo. Decidiu-se, portanto, construir o modelo MSCI tomando-se por base as hipóteses de Webster [1].

As hipóteses do MSCI são:

1) Chegada dos veículos: O tempo entre geração de veículos é regido por uma lei exponencial de distribuição de probabilidade cuja média é igual  $1/q$ , onde  $q$  é o fluxo médio que se deseja para a faixa em questão. Após serem gerados e antes de serem enviados para a interseção, os veículos passam por uma fila lógica (ver Figura 5-1). A taxa de descarga desta fila é igual a  $1/h_s$ , onde  $h_s$  é o *headway* que corresponde ao fluxo de saturação da faixa considerada. Se não existir nenhum veículo nesta fila, e o tempo decorrido desde a descarga do último veículo for maior ou igual que  $h_s$ , o veículo gerado passa direto pela fila sem sofrer nenhum atraso. Se não existir nenhum veículo na fila, mas o tempo decorrido desde a descarga do último veículo for menor que  $h_s$ , o veículo gerado aguarda o tempo suficiente para que o tempo decorrido

complete  $h_s$ . Desta forma, o tempo mínimo entre chegadas de veículos à interseção é igual a  $h_s$ . Esse procedimento foi adotado pelo fato de parecer natural que o intervalo mínimo de tempo entre dois veículos deva ser igual ao  $h_s$ , devido à própria definição de  $h_s$ . O modelo de Webster considera que podem ocorrer chegadas sucessivas em intervalos de tempo menores do que o *headway* de saturação ( $h_s$ ). Como será visto adiante, essa diferença nos modelos não foi traduzida em grandes diferenças nos resultados.

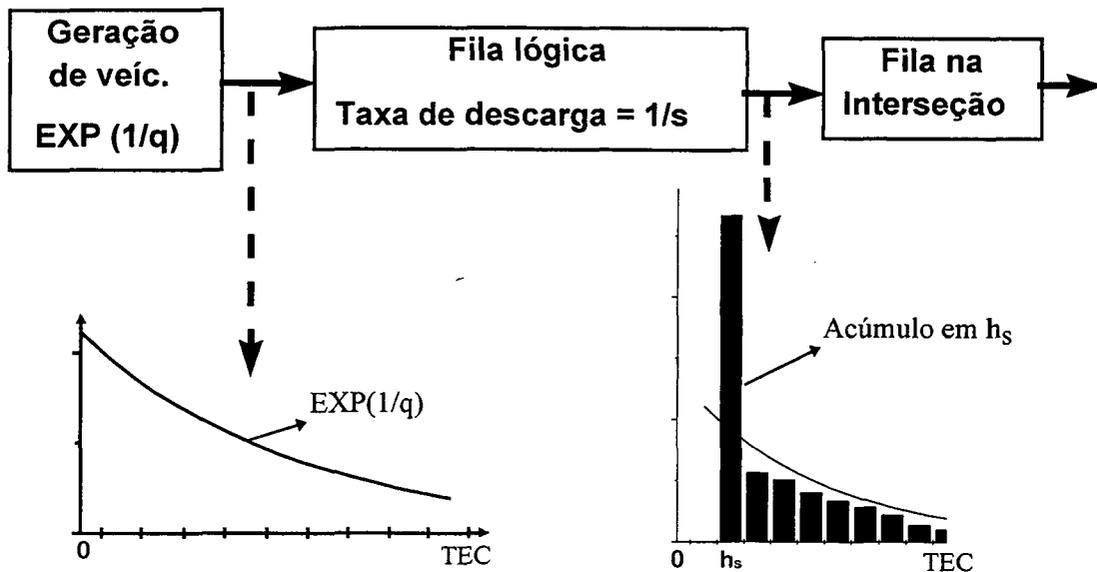


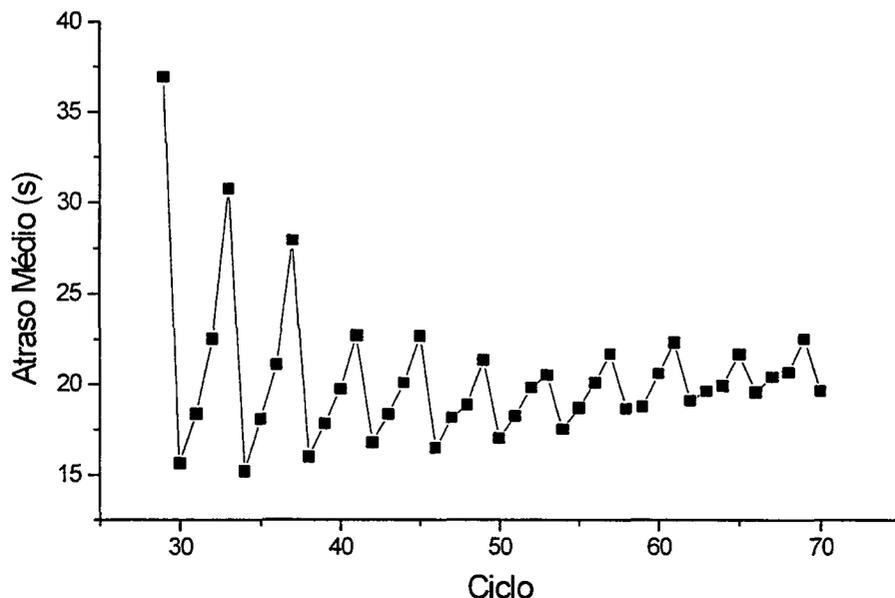
Figura 5-1 - Modelo de chegada

Apesar da fila lógica, descrita no parágrafo anterior, distorcer a distribuição exponencial geradora dos veículos, verifica-se que o fluxo médio de veículos que chega à interseção é o mesmo que é gerado pela função geradora de veículos, pois, ao longo do tempo, a fila lógica intermediária permanece praticamente vazia. A Figura 5-1 mostra as distribuições de frequências dos tempos entre chegadas (TEC) resultantes após a função geradora de veículos e após a fila lógica. Observa-se o efeito desejado decorrente da fila lógica, que é impedir a chegada de veículos à interseção em intervalos de tempo inferiores a  $h_s$ , o que não pode ser garantido pela função  $EXP(1/q)$ .

2) Descarga dos veículos: Antes de descrever a hipótese de descarga que é assumida no MSC1, descreve-se a hipótese de descarga que faz com que o comportamento do atraso seja tal como ilustrado na Figura 5-2 a seguir. Tal hipótese é a seguinte:

- Os veículos são descarregados das filas a uma taxa constante igual ao fluxo de saturação durante um tempo igual ao tempo de verde efetivo. No início do tempo

de verde um veículo é descarregado. Os próximos veículos partem em intervalos iguais ao *headway* de saturação ( $h_s$ ). Durante o tempo de vermelho, nenhuma descarga ocorre.



**Figura 5-2 - Atraso Médio X Ciclo para uma fase mostrando o efeito discreto.**

**Cruzamento com duas fases sendo:  $q_1=q_2=700$  v.p.h.,  $l=3s$ ,  $s=1800$  v.p.h.**

O comportamento periódico do atraso, decorrente desta hipótese, pode ser explicado da seguinte forma: como foi dito no capítulo 4, o atraso depende muito do número de veículos que são descarregados da fila durante o tempo de verde. No caso da Figura 5-2, o *headway* de descarga é de 2s. Quando o ciclo aumenta de 1s, o tempo de verde efetivo, para as duas fases, aumenta em meio segundo. Para que o número de veículos que se descarregam da fila aumente em um veículo, é necessária um tempo extra de verde no mínimo igual a 2s, que é o *headway* de descarga, o que equivale a um aumento no ciclo de 4s. Qualquer aumento do ciclo menor do que 4s não irá permitir que um carro a mais seja descarregado da fila durante um período de verde completamente saturado e, portanto, não fará o atraso diminuir. Pelo contrário, o atraso tende a aumentar devido ao consequente aumento dos tempos de vermelho sem uma recíproca vantagem no número de veículos descarregados. Na prática, o comportamento deve ser mais suave do que este, visto que o número de veículos que se descarregam de uma fila real, para um tempo de verde fixo, não é rigorosamente sempre o mesmo.

O modelo de Webster faz com que o primeiro veículo da fila seja impedido de se mover por um período de tempo adicional após o início do tempo de verde efetivo.

Esse atraso adicional é um número aleatório uniformemente distribuído entre zero e o *headway* mínimo. Portanto, depois que a luz verde se acende, o primeiro veículo aguarda até que se passe o tempo perdido  $I^2$ , depois aguarda o tempo adicional descrito acima. Só então, o primeiro veículo parte instantaneamente com a velocidade nominal de circulação. Esse comportamento na descarga faz com que a função do atraso com relação ao ciclo seja suavizada. Se tal hipótese não fosse feita, a natureza discreta da partida dos veículos apareceria na avaliação do atraso, tornando-o descontínuo como na Figura 5-2. O MSCI adota a hipótese de descarga de Webster.

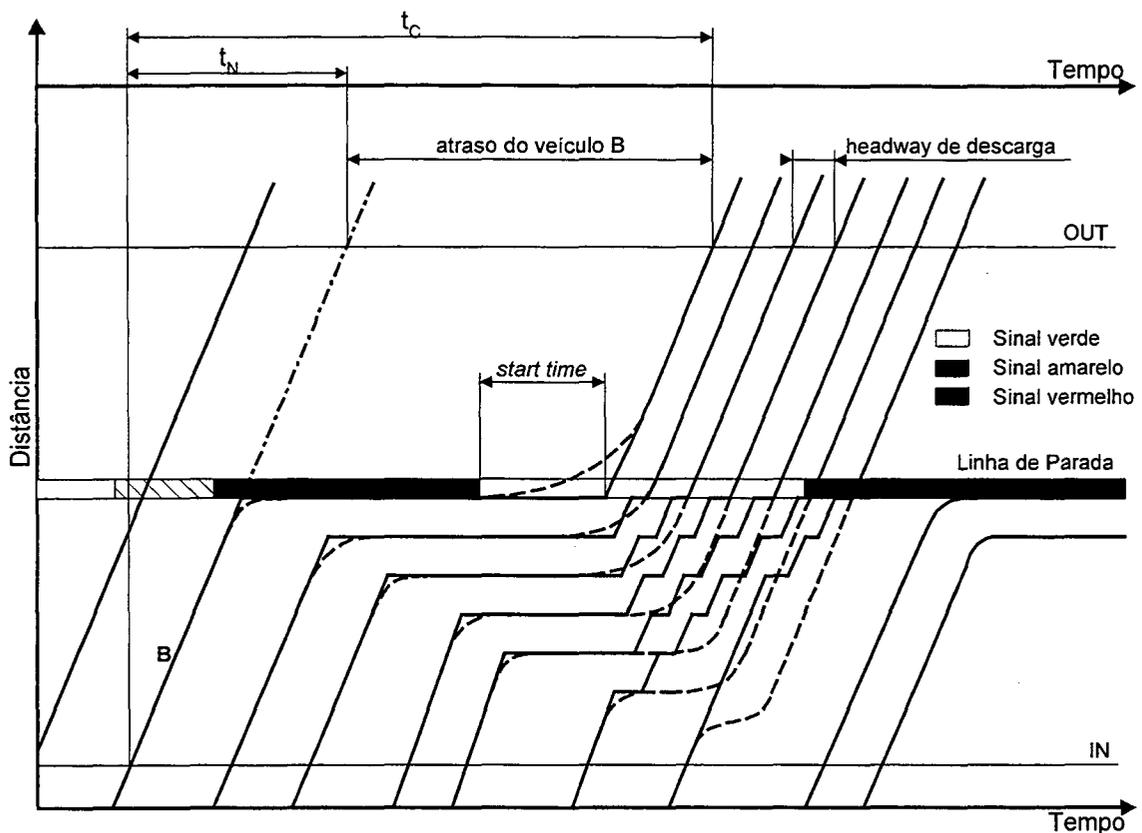


Figura 5-3 - Modelo de tráfego do MSCI.

<sup>2</sup> Neste ponto, o leitor deve se perguntar porque o veículo aguarda  $I$  e não o *start time*. Webster considera que o que importa é que o tempo de verde seja reduzido de uma quantidade  $I$  suficiente para permitir a descarga do número correto de veículos, como foi dito na seção 4.2.4. Esse modelo não faz distinção entre contabilizar o tempo perdido, devido à redução da taxa de descarga durante o sinal amarelo, no fim ou no início do tempo de verde. Escolhe-se contabilizar o tempo perdido  $I$  (*start time* + tempo perdido devido à redução da taxa de descarga durante o sinal amarelo) integralmente no início do tempo de verde.

3) Avaliação do atraso: Na Figura 5-3, a linha **IN** representa o limite de uma região que ainda não sofre a interferência do cruzamento. O ponto **OUT** está a uma distância suficientemente grande após o cruzamento, tal que os veículos já recuperaram a velocidade nominal de circulação. Previamente, sabe-se qual é o tempo  $t_N$  necessário para um veículo percorrer a distância entre estes dois pontos, supondo que a interseção não existe. O tempo  $t_C$  que um veículo gasta para fazer tal percurso na presença do cruzamento é medido. O atraso é calculado como  $t_C - t_N$ . Este cálculo é utilizado porque deriva diretamente da definição do atraso e pode ser facilmente implementado com os recursos da ferramenta de simulação. Webster utiliza um outro método para avaliar o atraso, baseado no tempo de espera de cada veículo na fila. A utilização do método baseado na definição também foi útil para verificar a equivalência das duas formas de avaliação do atraso.

Ainda sobre a Figura 5-3, as linhas cheias representam o comportamento dos veículos no modelo MSCI e as linhas tracejadas tentam capturar o comportamento mais próximo do real. Observe que o comportamento descontínuo da aceleração dos veículos no MSCI não altera o atraso. A forma como se processa a aceleração dos veículos não é relevante. A trajetória em escada no MSCI é um comportamento intrínseco do elemento da ferramenta que está sendo utilizado para implementar as ruas. Após a partida do primeiro veículo, o segundo aguarda um determinado tempo, não especificado, mas menor que o *headway* de saturação, e avança até a posição que o primeiro veículo ocupava. Um *headway* após a saída do primeiro veículo, o segundo parte definitivamente da fila. Depois que o segundo avança para a posição do primeiro, o terceiro aguarda um tempo, não especificado, e avança para a posição do segundo. Esse procedimento se repete para todos os veículos da fila.

A velocidade e o espaço entre os veículos também são parâmetros menos relevantes para a avaliação do atraso. Eles são substituídos pelos *headways*. Portanto, se um determinado *headway* deve ser representado no modelo, a velocidade e a distância entre os veículos são ajustados de forma a se obter o *headway* desejado. Observe, na Figura 5-3, que se a inclinação das linhas retas - velocidade - fosse alterada, os intervalos de tempo (*headways*, *start time* e atraso) poderiam ser mantidos os mesmos, bastando que se compensasse as distâncias.

4) Arranjo físico básico do cruzamento: A Figura 5-4 abaixo mostra o cruzamento modelado. São duas vias com duas faixas cada uma. Na realidade, para realizar o estudo sobre um cruzamento isolado com temporização fixa, apenas uma via e uma faixa seriam necessárias, pois, como afirmado em [1], neste caso o atraso pode ser estudado para cada via e cada faixa de forma independente. No entanto, uma das

finalidades do modelo é estudar controladores mais elaborados onde estes fatores são relevantes.

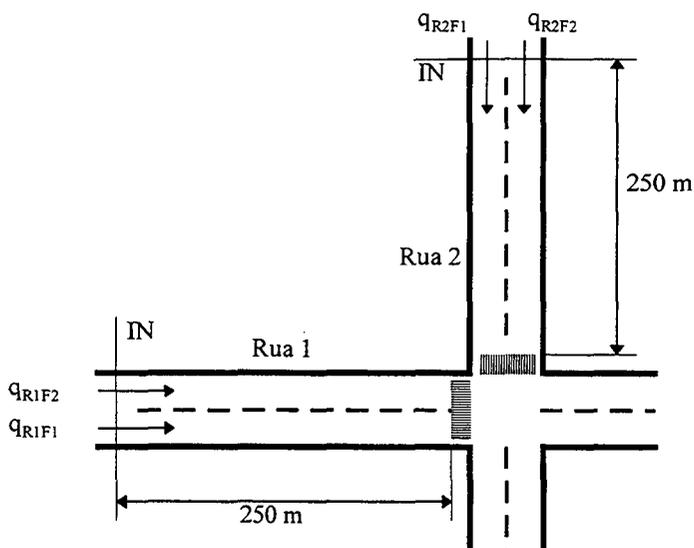


Figura 5-4 - Arranjo físico básico

Em [1], a faixa, a fila e os veículos nem mesmo têm dimensões físicas. Tudo se passa como se a interseção fosse um ponto. Não existe um percurso a ser percorrido entre o ponto onde os veículos são gerados e o cruzamento, os veículos são gerados na própria interseção e permanecem numa fila lógica até serem descarregados conforme a hipótese (2). Webster demonstra que isto não altera os resultados.

O fato do MSC1 possuir dimensões físicas gera um certo inconveniente. Em condições de saturação, quando as filas crescem excessivamente, o espaço entre o ponto IN e a linha de parada torna-se pequeno para acomodar a fila formada. Os veículos adicionais são acomodados numa fila lógica e passam para a fila física assim que algum espaço é liberado. A cronometragem do tempo  $t_c$  só começa no instante em que o veículo passa pelo ponto IN. Portanto, o tempo em que os veículos aguardam na fila lógica não é cronometrado. O problema pode ser contornado aumentando-se o espaço para a fila física de um tamanho suficiente para tornar tal truncagem insignificante. No caso, está sendo usado um espaço de 250m entre o ponto IN e a linha de parada, que é suficiente para uma fila de 62 veículos. Essa observação se faz necessária para explicar as diferenças entre as respostas dos modelos MSC1 e de Webster em condições de grande saturação.

Ainda na Figura 5-4,  $q_{R1F1}$  e  $q_{R1F2}$  representam respectivamente o fluxo médio de veículos na faixa 1 da rua 1 e o fluxo médio de veículos na faixa 2 da rua 1.  $q_{R2F1}$  e  $q_{R2F2}$  representam o equivalente para a rua 2.

Os dados de entrada normais do MSCI são:

- Para o tráfego:
  - Fluxo de saturação.
  - Fluxo médio de veículos:  $q_{R1F1}$ ,  $q_{R1F2}$ ,  $q_{R2F1}$  e  $q_{R2F2}$ .
  - Tempo perdido por fase.
- Para o controlador ( Ciclo fixo ):
  - Ciclo.

Neste ponto as seguintes observações podem ser feitas:

1) O *split* é feito automaticamente considerando divisão do tempo de verde efetivo proporcional às relações  $Y$  das faixas críticas<sup>3</sup>.

2) Além destes dados de entrada, o modelo é suficientemente flexível para permitir mudanças como: distribuição de chegada, número de fases, número de faixas, número de vias, etc.

Alguns parâmetros de saída do MSCI :

- Atraso médio por veículo para cada fase.
- Atraso total médio.

## 5.4 Ferramenta de Implementação e Metodologia Para Obtenção dos Resultados

O que se verificou na literatura de tráfego é que, hoje em dia, tem-se buscado utilizar *softwares* específicos para tráfego, especialmente para analisar grandes sistemas, como Redes Fechadas. Nas fases preliminares deste trabalho, fez-se uma investigação das ferramentas que estão disponíveis no mercado (endereço: [www.its.leeds.ac.uk](http://www.its.leeds.ac.uk)), mas descartou-se a hipótese de utilizá-las por vários motivos, entre eles: custo incompatível com o orçamento disponível e indisponibilidade de tempo suficiente para identificação da ferramenta mais adequada entre as que se apresentavam, que fornecesse flexibilidade suficiente para implementação de estratégias de controle em malha fechada.

---

<sup>3</sup> Ver seção 4-4.

A ferramenta que serviu de plataforma para a construção do MSCI foi o AUTOMOD® [7]. Este *software* é bastante utilizado para a modelagem e simulação de sistemas de manufatura de grande porte e complexidade. Um sistema de tráfego pode ser reduzido, num determinado nível de abstração, a um modelo de filas [9], o que foi feito também por Webster. Os sistemas produtivos, que geralmente são analisados pelo AUTOMOD®, também podem ser reduzidos a modelos de filas. Levado por essa analogia, decidiu-se modelar o tráfego utilizando este tipo de ferramenta. Além destas razões, as características técnicas que permitem considerar a aplicação de ferramentas de simulação de Sistemas a Eventos Discretos a tráfego são:

- Seu poder e facilidade no trato de modelos estocásticos, podendo-se obter distribuições de probabilidade para as variáveis de saída, bem como intervalos de confiança, com nível de confiança especificado pelo usuário. Recursos para o projeto de experimentos e análise de sensibilidade das variáveis e parâmetros do modelo.
- Flexibilidade para implementação de quaisquer estratégias de controle, comparável à oferecida pelas linguagens de programação convencionais.
- Disponibilidade de recursos para verificação e depuração do modelo, inclusive recursos de animação gráfica.
- Facilidade de implementação de modelos complexos, permitindo que haja menos hipóteses simplificativas.
- Disponibilidade da ferramenta.

Antes de comentar os resultados propriamente ditos, cabe fazer uma reflexão sobre o que vem a ser o resultado de um modelo de simulação deste tipo. Como o MSCI possui pelo menos uma variável de entrada aleatória e mais características aleatórias intrínsecas do próprio modelo, é de se esperar que as variáveis de saída também sejam variáveis aleatórias. Seria desejável ter, como resultado de cada variável de saída, as médias  $R$  das populações destas variáveis. Essas médias seriam obtidas apenas se fosse possível rodar a simulação durante um tempo infinitamente longo. Como isto não é possível, normalmente apresenta-se o resultado em duas partes, como na equação 5-1.

$$R = R_m \pm I_a \quad 5-1$$

O termo  $R_m$  representa a média dos resultados parciais obtidos de rodadas de simulação com duração finita. O termo  $I_a$  representa uma incerteza sobre o resultado e está associado a um determinado nível de confiança NC. Portanto, a equação expressa a seguinte idéia: o resultado  $R$  procurado se encontra no intervalo  $(R_m - I_a, R_m + I_a)$  com

um nível de certeza igual a NC. O intervalo  $(R_m - I_a, R_m + I_a)$  é chamado de intervalo de confiança

A amplitude do intervalo de confiança depende do número de amostras utilizadas para obtê-lo. Quanto mais amostras, para um mesmo nível de confiança, menor é a amplitude do intervalo de confiança e, portanto, menor é a incerteza sobre o resultado. Não seria de grande utilidade ter um intervalo de confiança muito mais preciso do que o próprio modelo de simulação em relação à realidade. Por exemplo, se o modelo possui um erro de 20% em relação à situação real, um intervalo de confiança que corresponda a 2% de incerteza sobre o resultado já seria bem razoável. A referência [6] discute em detalhes a questão do dimensionamento de amostras. Nesta referência recomenda-se não utilizar menos do que cinco amostras para a obtenção do intervalo de confiança. Como valor desejável, indica-se 10 ou mais. Aqui foram utilizadas dez amostras conforme procedimento descrito abaixo:

- Para cada conjunto de variáveis de entrada, simularam-se-se 2 horas (tempo real) de *warm up*<sup>4</sup> e mais 10 horas para a obtenção de uma amostra do conjunto de variáveis de saída. Para um fluxo baixo, como 300 v.p.h., dez horas permitem obter uma média do atraso sobre 3000 veículos, o que é um número bastante satisfatório. Portanto, a amostra de cada variável de saída, nesta etapa, já se constitui numa média sobre um tempo real simulado de 10 horas. O tempo de CPU para isto fica em torno de 3min, rodando em um Pentium 100 Mhz com 32 Mbytes de RAM.
- A etapa anterior é repetida dez vezes. A média das dez amostras de cada variável se constitui no termo  $R_m$  referente a esta variável. Além disto, intervalos de confiança com nível de confiança igual a 0.95 são construídos a partir destas amostras.

A incerteza  $I_a$  sobre o atraso, em segundos, pode ser vista para um caso específico na Tabela A-1, no anexo A. O valor médio das incertezas sobre o *Atraso MSCI* é de 2%, o que se considera um valor suficientemente pequeno e, portanto, o número de amostras também é considerado suficiente.

Os outros resultados apresentados no trabalho vão se referir apenas ao resultado básico  $R_m$ , pois procura-se manter a incerteza  $I_a$  sempre num nível tal que se possa fazer a simplificação  $R \approx R_m$ .

---

<sup>4</sup> Tempo necessário para o sistema atingir uma condição de regime após iniciar a partir de condições nulas. Refira-se a [7] para maiores detalhes.

## 5.5 Resultados e Validação do Modelo

A validação dos resultados foi feita por comparação com os resultados de Webster (equação 4-4). Tomou-se este modelo como padrão, estabelecendo-se que, se a diferença entre os resultados do MSCI e os resultados deste padrão fosse suficientemente pequena, o MSCI estaria validado. Para servir de suporte à comparação, dois experimentos foram realizados:

Experimento 1: Analisa-se uma faixa de rua cujo tempo de verde efetivo permanece fixo, congelando-se os parâmetros ciclo e  $\lambda$ , enquanto a demanda ( $q$ ) e, conseqüentemente, o grau de saturação ( $X$ ) são variados.

Experimento 2: A demanda permanece fixa enquanto o ciclo é variado. O *split* é proporcional à relação  $Y$ .

Em ambos os experimentos  $s$  permanece constante e igual a 1800 v.p.h. e, no experimento 2, o tempo perdido  $l$  é igual a 3,0 s/fase. O *layout* da interseção, ver Figura 5-4, é reduzido à uma faixa em cada rua.

$q$ (v.p.h.)	$X$	Atraso Webster (s)	Atraso MSCI (s)	Erro (s)	Erro (%)
90,0	0,10	4,88	5,1	0,3	6,14
180,0	0,20	5,3	5,5	0,2	3,3
270,0	0,30	6,0	5,9	-0,1	-1,4
360,0	0,40	6,6	6,3	-0,4	-5,4
450,0	0,50	7,5	6,9	-0,6	-7,3
540,0	0,60	8,5	7,8	-0,7	-8,0
630,0	0,70	10,0	9,3	-0,7	-7,2
720,0	0,80	13,0	12,7	-0,3	-2,1
810,0	0,90	22,4	22,5	0,2	0,8
828,0	0,92	27,2	25,8	-1,4	-5,2
846,0	0,94	35,4	32,8	-2,6	-7,3
864,0	0,96	51,8	48,1	-3,8	-7,2
		Mediana =		0,8	3,3

**Tabela 5-1 - Resultados do experimento 1. Ciclo = 35 s,  $\lambda = 0,5$  e  $s = 1800$  v.p.h.**

O *Atraso Webster* é calculado pela equação 4-4. O *Atraso MSCI* é obtido de acordo com o procedimento descrito na seção 5.4. Define-se *Erro* como: *Atraso MSCI - Atraso Webster*. O *Erro%* é igual a *Erro/Atraso Webster*.

A Tabela 5-1 apresenta os resultados do experimento 1. Pode-se observar que o erro absoluto máximo é de 3,8s, ou 7,2% do atraso segundo Webster, em condições de

grande saturação, leia-se  $X=0,96$ . A média dos erros ao longo de todo o intervalo de demanda não é superior a 1s, representando 3,3% em média ao longo do intervalo de demanda. Os dados de atraso da Tabela 5-1 estão plotados na Figura 5-5, encontrada adiante, de onde se pode concluir visualmente que os resultados do MSCI praticamente replicam a equação 4-4, para os parâmetros específicos analisados.

Para o experimento 2, foi suposto que a rua 1 tem um fluxo médio de 700 v.p.h e a rua 2 um fluxo de 400 v.p.h.. Os resultados numéricos estão expostos na Tabela A-1, que se encontra no anexo A. Os erros absolutos máximos para o Atraso Total Médio, Atraso na rua 1 e na rua 2 são, respectivamente: 5,0s, 2,1s e 11,6s, ou 14,5%, 12,5% e 25%. Todos em região de grande saturação. Os erros absolutos médios no intervalo de ciclo analisado são: menor do que 0,1s, 0,4s e 0,7s, ou 0,4%, 3,8% e 3,4% respectivamente. O conjunto de figuras: Figura 5-6, Figura 5-7 e Figura 5-8, na página seguinte, apresenta graficamente os dados desta última tabela.

Procurou-se buscar, com estes dois experimentos, analisar o poder de previsão do MSCI frente aos dois principais parâmetros que afetam o atraso, quais sejam, o fluxo e o ciclo. Obviamente, uma investigação completa em todo o domínio desta função levaria a uma explosão combinatória destes dois parâmetros. Portanto, considera-se satisfatória a investigação realizada.

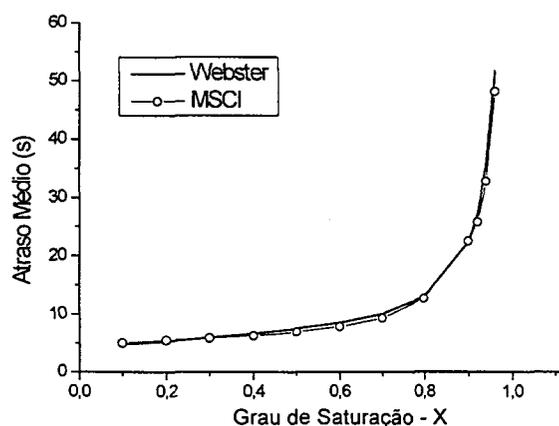


Figura 5-5

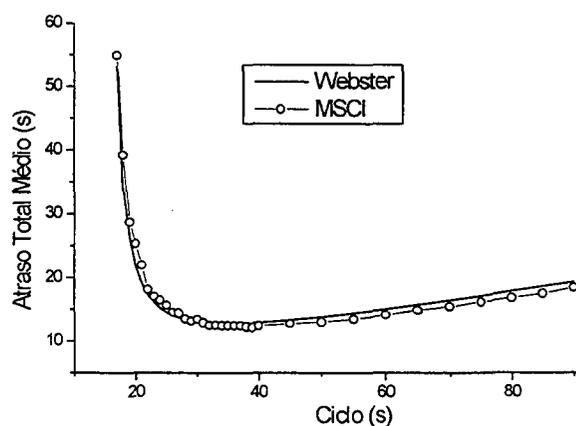


Figura 5-6

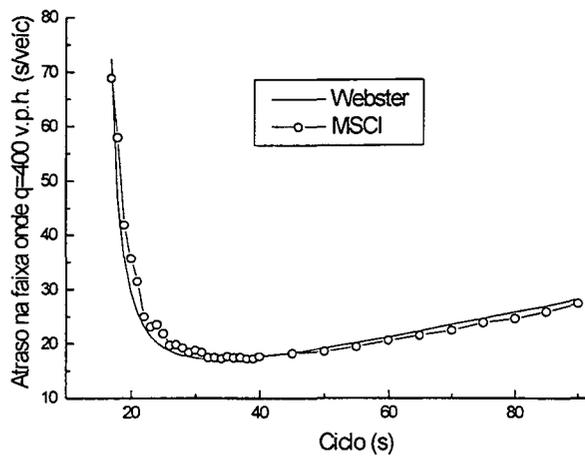


Figura 5-7

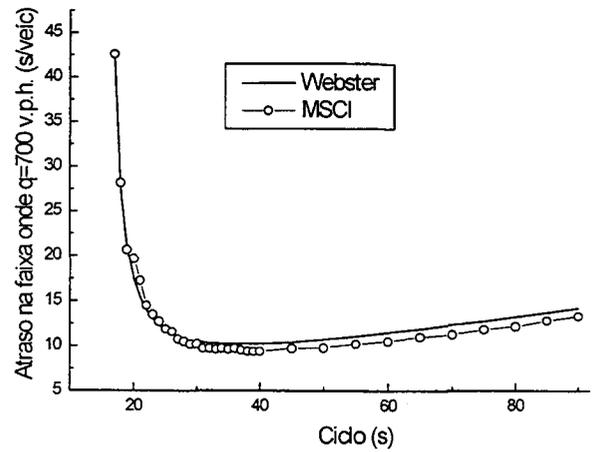


Figura 5-8

## 5.6 Conclusão

Neste capítulo o modelo MSCI foi apresentado. Verificou-se que as hipóteses adotadas no MSCI são praticamente as mesmas adotadas por Webster. Apesar das diferenças existentes entre os dois modelos, representadas pelas hipóteses 1 e 4, e pelo método diferente de avaliação do atraso, conclui-se que o MSCI é um modelo consistente com o modelo de Webster, tendo sido corretamente implementado. Baseado nesta conclusão, pode-se dar um passo a frente, implementando-se técnicas de controle em malha fechada, o que é discutido no próximo capítulo.

# Capítulo 6: Análise de Um Controle Em Malha Fechada para Interseções Isoladas

---

---

## 6.1 Introdução

Neste capítulo, um controlador de tráfego em malha fechada para interseções isoladas é discutido. Analisa-se os parâmetros internos e algumas variáveis externas ao sistema de controle que afetam o seu desempenho e faz-se uma comparação com o desempenho do sistema de ciclo fixo. Os resultados podem ser úteis para o projeto de instalação de um controlador desta natureza.

Espera-se que os sistemas de controle em malha fechada apresentem características de robustez, sendo capazes de se adaptar de forma automática às diversas condições de tráfego, proporcionando bom desempenho independentemente destas condições, ao contrário dos controladores pré-temporizados, que funcionam sob baixo desempenho caso o tráfego se comporte de maneira inesperada.

## 6.2 Métodos de Controle em Malha Fechada

A seguir, descreve-se resumidamente as características básicas de alguns métodos de controle de tráfego em malha fechada de acordo com as referências [4] e [5]. São descritos, também, detalhes específicos de modos de operação possíveis e geralmente usados para tais sistemas, embora esses detalhes possam variar de acordo com a implementação ou as características específicas do projeto.

- Controle semi-realimentado:

É apropriado para o cruzamento de vias de menor fluxo com vias principais. O que caracteriza tal sistema é a existência de detetores apenas na via secundária, de onde surge a denominação *semi-realimentado*. A duração do ciclo e das fases são variáveis aleatórias e dependem do fluxo da via secundária. No modo de operação geralmente utilizado, a luz verde é dada continuamente à via principal, onde não há

detetor, até que o sistema receba uma indicação de chegada de um veículo na via secundária. Caso a via principal já tenha recebido um tempo de verde maior ou igual a um tempo mínimo prefixado, a fase muda para dar direito de passagem à via secundária. Caso contrário, a mudança fica adiada até que o tempo mínimo de verde se esgote. O tempo de verde da via secundária será igual a um tempo mínimo prefixado acrescido de incrementos para cada veículo que chegar à interseção através da via secundária, até que seja atingido um tempo máximo. A indicação verde para a via secundária também pode ser interrompida caso o intervalo entre duas detecções consecutivas seja maior do que um valor máximo prefixado.

Durante condições de tráfego intenso, o sistema tende a se comportar como o de ciclo fixo, visto que o verde da via principal sempre se restringe ao valor mínimo e o da secundária frequentemente atinge o valor máximo. Conclui-se que a principal vantagem do sistema semi-realimentado, comparado com o de ciclo fixo, é estender o tempo de verde da via principal em períodos de tráfego leve. Além disto, em condições de tráfego pesado, pode-se tirar vantagem das flutuações de fluxo da via secundária [5].

- Controle completamente realimentado (CCR):  
É adequado para interseções formadas por vias de fluxo igualmente intenso, ou quando os fluxos leve e pesado mudam periodicamente de uma via para outra. Detetores de presença são posicionados em todas as vias e a rotina de operação básica, geralmente empregada, é essencialmente a mesma descrita acima para o sistema semi-realimentado, exceto que todas as vias são tratadas como vias secundárias. Uma das vias fica com o sinal verde até que seja vencido um tempo de verde mínimo (MinTV). O tempo de verde pode ser estendido além do mínimo até que o intervalo de tempo transcorrido entre duas detecções consecutivas seja maior do que um intervalo previamente definido (MaxTED). O primeiro veículo a chegar na fase oposta<sup>1</sup> não pode esperar pela indicação verde mais do que um tempo máximo prefixado (MaxTE). Antes que isto ocorra, o controlador faz com que o verde da fase que está sendo contemplada se encerre [4].
- Controle com característica de *volume-densidade*:  
É uma espécie de CCR com características adicionais. Existe uma hierarquia superior na estrutura do controlador que ajusta os tempos MinTV, MaxTED e MaxTE baseada numa avaliação mais elaborada das condições de tráfego. Por exemplo, o tempo de verde mínimo de uma fase pode variar a cada ciclo e depender de uma estimativa do número de veículos existentes na fila entre o detetor

---

<sup>1</sup> Por *Fase oposta* entende-se qualquer outro conjunto de movimentos diferente do que está sendo contemplado.

e a linha de parada. Informações sobre o tráfego são armazenadas na memória e continuamente analisadas para ajustar os parâmetros do controlador [5]. Variáveis de estado como tamanho de fila, ocupação, fluxo e outras podem ser levadas em consideração [4].

### 6.3 Detalhes da Operação do CCR Implementado para Análise

Neste tópico, apresenta-se os detalhes da operação do CCR que foram implementados no MSCI para fins de análise de desempenho. Este CCR se encaixa dentro das características de um sistema básico, sem características de *volume-densidade*. A maior parte da especificação deste sistema foi extraída de [4], mas apresenta algumas pequenas alterações.

Os parâmetros que governam a operação do CCR são:

- Máximo tempo de espera.
- Máximo tempo entre detecções, brecha crítica ou *maximum gap*; e
- Mínimo tempo de verde ou *minimum green*;

De acordo com a definição de um CCR básico [4] e [5], sem características de *volume-densidade*, estes parâmetros são previamente ajustados e permanecem fixos durante o tempo de operação. No entanto, nada impede que se faça um reajuste automático destes parâmetros de acordo com a hora do dia, por exemplo, como é feito com o ciclo nos sistemas pré-temporizados. No CCR com característica de *volume-densidade* este reajuste é continuamente feito *on-line*.

#### 6.3.1 Máximo Tempo de Espera (*MaxTE*)

É o máximo tempo que o controlador pode sustentar o direito de passagem de uma fase em presença de um veículo aguardando numa fase oposta. É geralmente estabelecido entre 30 e 60 segundos [4]. Observe, na Figura 6-1, que *MaxTE* só começa a ser cronometrado no instante em que um veículo é detectado na fase oposta. Portanto, *MaxTE* não define, de forma determinística, o tamanho de uma fase (verde+amarelo)<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Na referência [4] o *MaxTE* não engloba o tempo de amarelo. Isto foi feito aqui para dar coerência ao nome, visto que, se não englobasse o tempo de amarelo, a fase oposta aguardaria, na verdade, *MaxTE+amarelo* e ainda mais o

O tempo decorrido entre o início de uma fase A e o instante em que o primeiro veículo é detectado na fase oposta B será referido como  $\Delta_B$  (ver Figura 6-1 a seguir).  $\Delta_B$  é uma variável aleatória cujo valor esperado é tanto menor quanto maior for o fluxo na fase B. O valor de uma fase para o qual o limite MaxTE é atingido será referido como Maxfase e, no caso de a fase ser a fase A, é dado por:

$$\text{Maxfase}_A = \text{MaxTE} + \Delta_B \quad 6-1$$

O valor esperado de  $\text{Maxfase}_A$  é dado por:

$$E\{\text{Maxfase}_A\} = \text{MaxTE} + E\{\Delta_B\} \quad 6-2$$

Onde:

$E\{\text{Maxfase}_A\}$  = valor esperado de  $\text{Maxfase}_A$ .

$E\{\Delta_B\}$  = valor esperado de  $\Delta_B$ .

Se a fase B estiver saturada, então, sempre existirá um veículo aguardando na fase B no momento em que a fase A se inicia. Sendo assim,  $E\{\Delta_B\} \rightarrow 0^3$  e  $E\{\text{Maxfase}_A\} \rightarrow \text{MaxTE}$ . Será visto mais adiante que, sob certas condições,  $\text{fase}_A \rightarrow E\{\text{Maxfase}_A\} \rightarrow \text{MaxTE}$ .

### 6.3.2 Máximo Tempo Entre Detecções (MaxTED)

É o máximo intervalo de tempo que pode transcorrer entre as detecções de dois veículos consecutivos sem que a fase corrente seja terminada. O *intervalo de veículo* é o tempo requerido para um veículo viajar do detetor até a interseção. O intervalo de veículo é frequentemente utilizado como valor para MaxTED. Porém, nada impede que outra duração, diferente do intervalo de veículo, seja usada para estabelecer o MaxTED. Enquanto os intervalos de tempo entre detecções consecutivas forem

---

tempo de vermelho de segurança, se este existisse. Além disto, na literatura de língua inglesa, o intervalo MaxTE-amarelo é conhecido como *maximum green*. No entanto, este termo não é totalmente apropriado, visto que frequentemente ocorrem tempos de verde maiores do que o *maximum green* durante a operação do sistema, pois, este só começa a ser cronometrado no instante em que o primeiro veículo é detectado na fase oposta.

<sup>3</sup> O símbolo de tendência “ $\rightarrow$ ” é usado em lugar de “ $=$ ”, pois, sendo essa uma variável aleatória, não se pode garantir a relação de igualdade exata, “ $=$ ”.

menores do que o MaxTED prestabelecido, a fase corrente será mantida até que o MaxTE seja atingido.

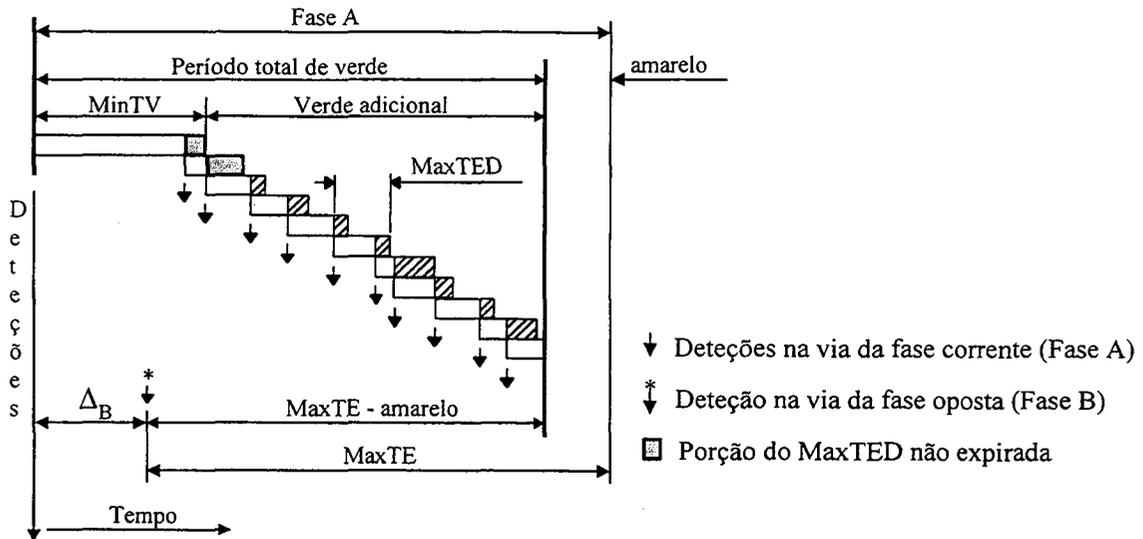


Figura 6-1 - Operação do CCR

Uma vez que o tempo entre a detecção de um veículo e a próxima detecção começa a ser cronometrado, e um veículo adicional é detectado antes que o tempo transcorrido seja maior do que o MaxTED, a cronometragem corrente é cancelada e uma nova cronometragem é iniciada. Este processo é repetido para a detecção individual de cada veículo, até que (1) o tempo entre duas detecções sucessivas seja maior do que o MaxTED ou (2) um tempo igual a MaxTE-amarelo seja atingido. Em qualquer destes dois casos o tempo de sinal amarelo é iniciado, após o qual uma nova fase se inicia. A Figura 6-1 ilustra a situação onde sucessivas detecções ocorrem. Todos os tempos entre detecções são menores do que o MaxTED e o máximo tempo de espera prestabelecido foi atingido.

Em sistemas que utilizam detetores de anel longo, o MaxTED é estabelecido como o tempo necessário para um veículo percorrer uma distância igual ao comprimento do detetor mais o tamanho de um veículo.

### 6.3.3 Mínimo Tempo de Verde (MinTV)

Nos sistemas de controle que não possuem a capacidade de estimar o tamanho da fila formada atrás da linha de parada, o tempo mínimo de verde é estabelecido com base no número máximo de veículos que podem ser armazenados no espaço entre o detetor

e a linha de parada. A lógica disto é permitir que o tempo de verde seja suficiente para possibilitar a passagem dos veículos que já estavam aguardando enquanto o sinal estava vermelho. Uma vez que este número é conhecido, o tempo mínimo de verde pode ser calculado e permanece fixo durante todo o tempo de operação do sistema. Quando detetores pontuais são utilizados, recomenda-se que o tempo mínimo de verde seja calculado assumindo que ocorre um *start time* equivalente a 4 segundos, que o *headway* de descarga da fila é de 2 segundos por veículo, e que o tempo mínimo de verde deve ser pelo menos igual a  $(4 + 2n)$ , onde  $n$  é o número máximo de veículos que podem ser armazenados entre a linha de parada e o detetor. O valor de  $n$  é usualmente computado assumindo um comprimento médio dos veículos igual a 20 pés ( $\approx 6$  metros)<sup>4</sup>. Um tempo de verde muito grande reduz a eficiência do sistema para responder a mudanças nas demandas de tráfego. Desta forma, recomenda-se 120 pés ( $\approx 36$  metros) como uma distância limite para a posição do detetor.

Utilizando um detetor de anel longo - ou outra configuração qualquer que tenha capacidade de detecção ao longo de uma seção - o tempo mínimo de verde é colocado como zero quando a extremidade do detetor está sob a linha de parada. Se sua extremidade está a uma certa distância da linha de parada, esta distância é utilizada para determinar o tempo mínimo de verde da mesma forma como realizada com detetores pontuais.

No caso de sistemas de controle que possuem a capacidade de avaliar o número corrente de veículos que são armazenados entre a linha de parada e o detetor, durante o sinal vermelho, o tempo mínimo de verde é continuamente reajustado durante a operação do sistema, de acordo com este número. Neste caso, a distância máxima entre o detetor e a linha de parada pode ser maior.

O MinTV começa a ser cronometrado no início da fase. Ao final do MinTV, inicia-se a cronometragem de um MaxTED, caso uma outra já não esteja em andamento, devido à detecção de um veículo na fase corrente, antes do fim do MinTV, como mostrado na Figura 6-1. Em qualquer destes dois casos, o processo passa a ser governado conforme o protocolo descrito na seção 6.3.2.

---

<sup>4</sup> Estes são parâmetros da literatura americana, cuja realidade pode ser bem diferente da brasileira. Além disto, o tamanho médio de veículos varia bastante de uma via para outra, devido a composição do tráfego, mesmo dentro de uma mesma cidade. Portanto, este parâmetro deve ser calibrado em cada instalação.

## 6.4 Análise de Desempenho de um CCR

Para fins de estudo do desempenho de um CCR sem características de volume-densidade, o modelo MSCI, apresentado no capítulo 5, foi equipado com um controlador tal qual descrito na seção 6.3. Todas as hipóteses de comportamento do tráfego utilizadas no MSCI para simular o sistema pré-temporizado foram mantidas no modelo do controlador em malha fechada. O objetivo foi o de permitir uma comparação de desempenho entre o sistema completamente realimentado (CCR) e o de temporização fixa. Além disto, desejava-se utilizar um modelo de tráfego previamente validado, no caso o MSCI. Portanto, as hipóteses de chegada e descarga de veículos foram mantidas e o que se modificou foi apenas o controlador do semáforo.

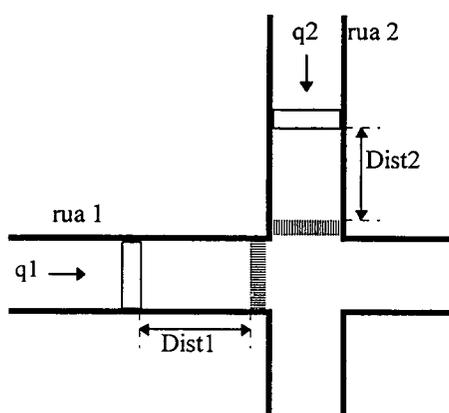


Figura 6-2 - Arranjo físico da interseção

O arranjo físico do cruzamento modelado está ilustrado na Figura 6-2. As ruas 1 e 2 possuem uma única faixa cada, com detetores pontuais posicionados a distâncias  $Dist1$  e  $Dist2$  das respectivas linhas de parada. Os fluxos médios nas ruas 1 e 2 são respectivamente  $q1$  e  $q2$ . Todas as situações simuladas consideram um fluxo de saturação de 1800 v.p.h., um tempo de amarelo de 3 segundos para todas as fases, um tempo perdido  $l$  de 3 segundos por fase e um tempo de vermelho de segurança  $R$  igual a zero.

O número de fases, número de faixas em uma via e a existência ou não de detetores em todas as faixas, são fatores que interferem no desempenho do controle em malha fechada. Portanto, a escolha de um cruzamento com apenas uma faixa por via tem o objetivo de eliminar a condição “existência ou não de detetor em cada faixa”, facilitando a análise e a comparação com o controlador de ciclo fixo.

Outro fator externo ao sistema de controle que influencia o seu desempenho são as demandas de tráfego que disputam a permissão de passagem no cruzamento. Deseja-

se avaliar o comportamento do CCR submetido a condições de tráfego leve e pesado, e sob diferentes condições de distribuição de fluxo nas duas ruas.

Os parâmetros MinTV, MaxTE e MaxTED, a distância dos detetores até a linha de parada e o tipo de detetor utilizado, são os fatores internos ao sistema de controle que mais afetam o seu desempenho. Sua análise tem o objetivo de determinar os valores que levam a um desempenho otimizado do sistema e sua relação com os parâmetros externos.

A análise por simulação tem uma restrição importante a ser considerada, que é a indisponibilidade de tempo suficiente para uma análise das respostas do modelo frente a todo o domínio de valores das variáveis e parâmetros que o afetam [10]. Esta inclusive é uma crítica clássica aos modelos de simulação e que neste caso também se aplica. No intuito de promover um conhecimento razoavelmente útil para fins de pesquisa e considerações preliminares de projeto, foi realizada uma varredura sobre as principais variáveis que afetam o CCR, dentro de intervalos considerados realistas - aplicáveis na prática. Tais análises permitem, também, extrapolações qualitativas para as situações não simuladas. No caso do projeto de um sistema de controle desta natureza, recomenda-se que seja desenvolvido um modelo de simulação específico e que sejam realizadas análises baseadas nos dados de demanda e *layout* esperados para o cruzamento em questão.

#### **6.4.1 Análise do Parâmetro MaxTE**

Nesta seção faz-se a análise da variação do atraso dos veículos que cruzam a interseção em função do parâmetro MaxTE. Os resultados são apresentados em gráficos e são comentados a seguir.

As figuras 6-3 e 6-4, a seguir, mostram os resultados das análises feitas sobre o parâmetro MaxTE que foi investigado para valores de 7,5 a 150 segundos. Os valores de MaxTE são sempre iguais para ambas as fases. Os outros parâmetros internos que definem o desempenho do controlador foram fixados de acordo com os seguintes valores:

- $Dist1 = Dist2 = 9m$ , correspondendo a dois veículos entre o detetor e a linha de parada.
- $MinTV = 7s$ , conforme recomendado na seção 6.3.3, ou seja,  $7s = 2h_s + 1$ . Igual para as duas fases.
- $MaxTED = 4s$ . Igual para as duas fases.

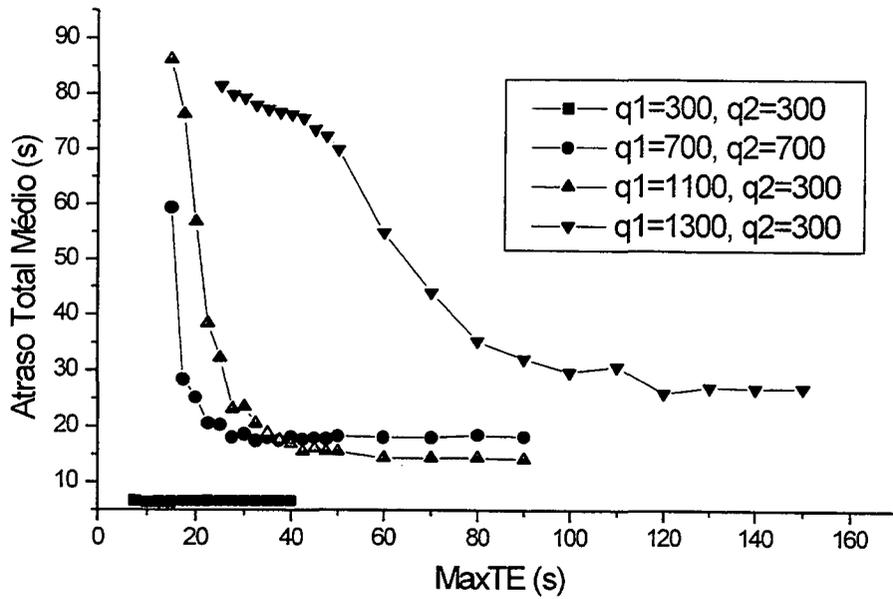


Figura 6-3 - Atraso total médio em função de MaxTE. Valores de fluxo em v.p.h.. MaxTED = 4s.

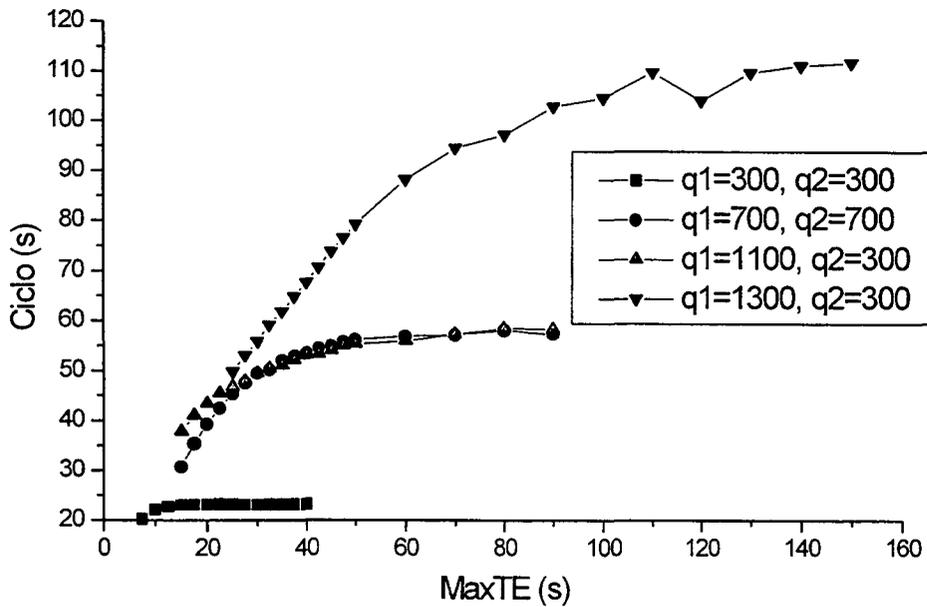


Figura 6-4 - Ciclo médio em função de MaxTE. Valores de fluxo em v.p.h. MaxTED=4s.

A Figura 6-3 apresenta a variação do *atraso total médio*<sup>5</sup> (**D**) dos veículos que cruzam a interseção em função de MaxTE. A Figura 6-4 apresenta a variação do *ciclo médio*<sup>6</sup> em função de MaxTE. Ambos os gráficos apresentam quatro curvas correspondentes a diferentes valores de demanda,  $q_1/q_2$ , conforme respectivas legendas.

Para entender o comportamento das curvas nas figuras 6-3 e 6-4, é fundamental entender o mecanismo que influencia o tamanho de cada fase e, conseqüentemente, o ciclo médio resultante:

Durante a descarga de uma fila, o intervalo entre detecções de veículos é igual ao *headway* de descarga da fila, considerando que a fila se move sobre o detetor. Colocam-se então duas proposições:

- (1) - A fila é muito grande.
- (2) - O intervalo entre detecções é menor do que o MaxTED.

Se a fase estiver saturada, as proposições 1 e 2 estão satisfeitas para esta fase, pois, neste caso, as filas são grandes (1) e o intervalo entre detecções é igual a 2s. Como MaxTED é 4s, a proposição 2 está satisfeita. Sendo as condições 1 e 2 verdadeiras, o verde é mantido até que MaxTE seja atingido e pode-se escrever:

$$E\{fase_A\} = MaxTE + E\{\Delta_B\} \quad 6-3$$

Onde  $E\{\cdot\}$  significa valor esperado. Conforme seção 6.3.1, se as fases A e B de um cruzamento estão saturadas, então:

$$E\{\Delta_A\} \rightarrow 0$$

$$E\{\Delta_B\} \rightarrow 0$$

Isto leva a:

$$E\{fase_A\} = E\{fase_B\} = MaxTE \quad 6-4$$

Da definição de ciclo, fase e vermelho de segurança conclui-se que:

---

<sup>5</sup> Corresponde à média dos atrasos de todos os veículos que cruzam a interseção. Não se trata da média dos atrasos apenas dos veículos oriundos de uma faixa de via em particular.

<sup>6</sup> O *ciclo médio* é o valor esperado da variável aleatória ciclo. Como foi visto na seção 6.3, o CCR é um sistema de ciclo variável. O ciclo é uma variável aleatória que depende das detecções dos veículos.

$$E\{\text{ciclo}\} = E\{\text{fase}_A\} + E\{\text{fase}_B\} + 2R \quad 6-5$$

De 6-4 e 6-5 segue que:

$$E\{\text{ciclo}\} = 2(\text{MaxTE} + R) \quad 6-6$$

Portanto, em condição de saturação das duas fases, o ciclo médio fornecido pelo CCR é praticamente determinístico e aproximadamente igual a  $2(\text{MaxTE} + R)$ . Se apenas a fase A estiver saturada então:

$$E\{\text{ciclo}\} = \text{MaxTE} + E\{\Delta_B\} + E\{\text{Fase}_B\} + 2R \quad 6-7$$

Se as duas ou apenas uma das fases estiver saturada, o ciclo médio será uma função de MaxTE. Afirmar-se, com a justificativa sendo dada nos parágrafos seguintes, que pelo menos uma das fases está saturada no gráfico da Figura 6-3 correspondente a valores elevados de atraso. Portanto, o ciclo é uma função de MaxTE nesta região de atrasos grandes, ver Figura 6-3.

Fora da saturação, não se pode mais garantir a condição 2, ou seja, não se pode garantir que o intervalo entre detecções sucessivas é sempre menor do que MaxTE. Portanto, o fator que determina o ciclo se modifica. O processo passa a ser mais aleatório. O ciclo tende para uma média governada pelo protocolo apresentado na seção 6.3.2. Esta é a situação predominante nas regiões dos gráficos das figuras 6-3 e 6-4 onde o ciclo e o atraso não mais variam com o MaxTE. Nesta condição, quanto maior for o fluxo da fase corrente, menor é a probabilidade de ocorrência de um tempo entre detecções maior do que o MaxTE. Conseqüentemente, maior é a probabilidade de sustentar o verde por mais tempo e, portanto, maior é o ciclo. Resumindo: em condição de saturação, o tamanho do ciclo tem uma forte componente determinística e é praticamente determinado por MaxTE. Fora da saturação, o ciclo é governado pelo tempo entre chegadas de veículos, ou fluxo, e tende para uma média.

Sabe-se, da seção 4.5, que a capacidade é uma função crescente do ciclo. Observe, na Figura 6-4, que para um determinado intervalo de MaxTE, dependente da demanda, o ciclo cresce e depois se estabiliza. Portanto, sendo a capacidade uma função crescente do ciclo e o ciclo uma função crescente de MaxTE, neste intervalo, tem-se que a capacidade é uma função crescente de MaxTE, também neste intervalo.

Postos estes esclarecimentos preliminares, pode-se passar para a análise das figuras 6-3 e 6-4. Na Figura 6-3, todas as curvas, exceto aquela para as quais  $q_1=q_2=300$  v.p.h.,

mostram um atraso grande para valores pequenos de MaxTE que decresce e se estabiliza. Os altos valores de atrasos, resultantes de valores pequenos de MaxTE, se devem ao fato da capacidade da interseção, determinada por esses valores baixos de MaxTE, ser insuficiente para dar vazão as demandas 700/700<sup>7</sup>, 1100/300 e 1300/300. Isso faz com que o tráfego fique saturado e o atraso cresça. No entanto, MaxTE = 7,5s é suficiente para promover o escoamento da demanda 300/300, por isto se tem, para este nível de demanda, valores baixos de atraso. Para ilustrar o que esta sendo afirmado, pode-se fazer um cálculo aproximado da capacidade da interseção com o auxílio da equação 4-24, transcrita abaixo:

$$N_h = s - \frac{ns(l + R)}{C} \quad 4-24$$

Na Figura 6-4 para a curva de demanda 700/700, o valor do ciclo médio, para o qual MaxTE = 17s, corresponde a 31s. Fazendo  $s = 1800$  v.p.h.,  $n = 2$  fases,  $l = (3+1)s^8$ ,  $R = 0s$  e  $C = 31s$  em 4-24, tem-se  $N_h = 1335$  v.p.h.. Portanto, a capacidade resultante, quando o parâmetro MaxTE é igual a 17s, é insuficiente para dar vazão a um fluxo total de 1400v.p.h., o que faz com que a interseção fique saturada e o atraso seja grande. À medida que MaxTE cresce, o ciclo cresce, a capacidade aumenta, as filas se dissipam e, conseqüentemente, o atraso diminui. A partir de um certo valor de MaxTE, o ciclo não cresce mais, pois a capacidade passa a ser suficiente para tirar a interseção da condição de saturação e, portanto, o parâmetro MaxTE passa a não mais ter tanta influência sobre o ciclo, pelas razões comentadas anteriormente. Observe, na Figura 6-4, que o valor limite para o qual MaxTE deixa de influenciar decisivamente no ciclo e, conseqüentemente, no atraso, é tanto maior quanto maior for a demanda. Para a demanda 300/300, esse valor é da ordem de 14s. Para a demanda 1300/300 este valor é da ordem de 140s. Isto se deve ao fato de cada demanda requerer uma capacidade diferente da interseção para fazer fluir o tráfego e, portanto, mudar o fator que determina o crescimento do ciclo. Este valor limite de MaxTE, o qual será referido como MaxTEo, também tem outra importância fundamental, pois corresponde ao ponto a partir do qual o atraso passa a ser mínimo.

A Figura 6-3 mostra que o desempenho do CCR depende da distribuição das demandas nas duas ruas. A curva de demanda 1100/300 possui um desempenho pior do que a curva de demanda 700/700., para valores baixos de MaxTE. O desempenho

<sup>7</sup> Abreviação para a curva de demanda  $q_1=q_2=700$ v.p.h. O mesmo será feito para se referir às outras curvas demanda dos gráficos.

<sup>8</sup> Na realidade  $l = 3s$ , mas o modelo de descarga de Webster, adotado no MSCI, prevê um atraso adicional do primeiro veículo da fila igual a 1s em média, conforme descrito no capítulo 5. Este atraso deve ser considerado neste cálculo, para que haja consistência com os resultados obtidos.

se inverte para valores maiores de MaxTE, quando o atraso já está estabilizado. O MaxTEo para a curva 700/700 é menor do que o MaxTEo para a curva 1100/300.

É importante observar que boa parte das análises feitas acima não foram comprovadas com rigor matemático, justamente por não se dispor de um modelo matemático analítico para o desempenho do CCR. Este não é o foco deste trabalho. A maior parte daquela discussão foi deduzida do entendimento qualitativo sobre o mecanismo do controlador. E o objetivo é passar ao leitor parte deste entendimento para que este tire suas próprias conclusões. No entanto, a discussão do “porque” que os resultados são como os apresentados pelos gráficos, não altera o fato de eles serem como são. Ou seja, os resultados das simulações continuam sendo valiosos, sobretudo para a orientação de projetos. As conclusões resumidas a seguir são justamente aquelas que são úteis aos que se interessam pelos aspectos relativos a projeto. E, talvez, representem a contribuição mais útil deste tipo de análise. As conclusões são:

- Existe um valor de MaxTE acima do qual o atraso total médio por veículo é mínimo, o qual será referido como MaxTEo.
- O MaxTEo depende da demanda de tráfego, sendo maior para demandas maiores. A seleção de um MaxTE que garanta o melhor desempenho para a maior demanda esperada irá garantir, também, o melhor desempenho para demandas mais leves. A referência [4] recomenda, sem maiores esclarecimentos, um limite em torno de 60s para o tempo máximo de verde de cada fase. Acredita-se que a recomendação de um limite superior se deve a questões de segurança, visto que, numa situação de saturação extrema, uma ou mais fases poderiam ser bloqueadas indefinidamente. No entanto, a Figura 6-3 mostra que, se demandas elevadas e persistentes são esperadas, valores de até 120s podem ser necessários para conseguir desempenho otimizado do CCR - ver curva de demanda 1300/300 na Figura 6-3 . 60s é um valor acima do qual já se tem um bom desempenho para demandas totais em torno de 1400 v.p.h. ou até um pouco superiores.
- A Figura 6-3 mostra que o sistema produz um desempenho um pouco melhor para situações de demanda desequilibrada, para valores de MaxTED acima de MaxTEo. A situação de demanda 1100/300 resulta num atraso total médio de 14s e a situação 700/700 fornece 18s de atraso, ambos considerando MaxTE=60s.
- A Figura 6-4 mostra que, para cada situação de demanda, existe um limite superior para o ciclo médio, que é tanto maior quanto maior for a demanda. Para os experimentos cuja demanda total é de 1400 v.p.h, por exemplo, não adianta elevar

MaxTE acima de 60s que não se conseguem aumentos significativos no ciclo, embora o parâmetro MaxTE permita.

- Na Figura 6-4, observa-se que, para as curvas 1100/300 e 700/700 que possuem o mesmo valor de demanda total, o ciclo se estabiliza no mesmo patamar. Apenas a trajetória através da qual o ciclo tende para este patamar é que é diferente.

#### 6.4.2 Análise do Parâmetro MaxTED

As figuras 6-5 e 6-6 mostram os resultados das simulações feitas para a análise sobre o parâmetro MaxTED:

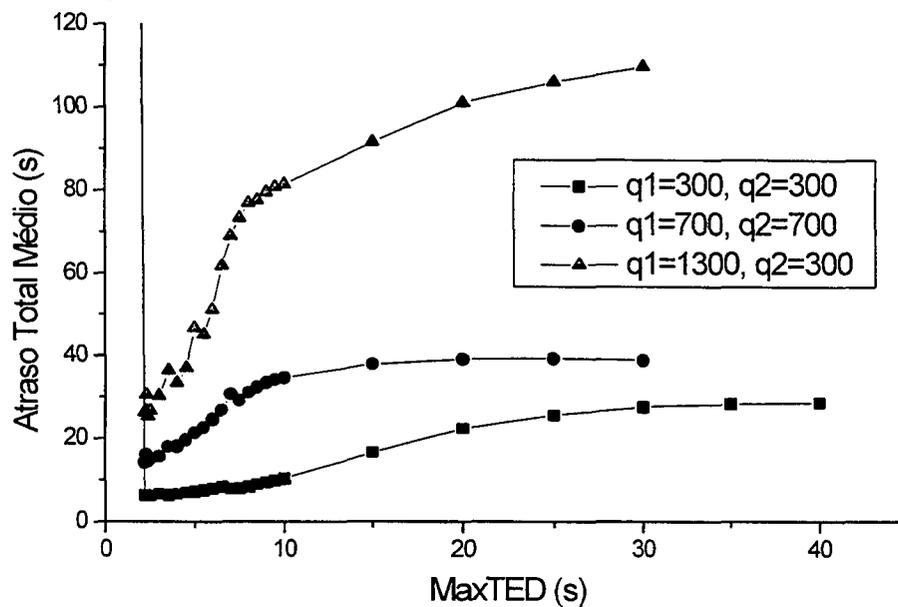
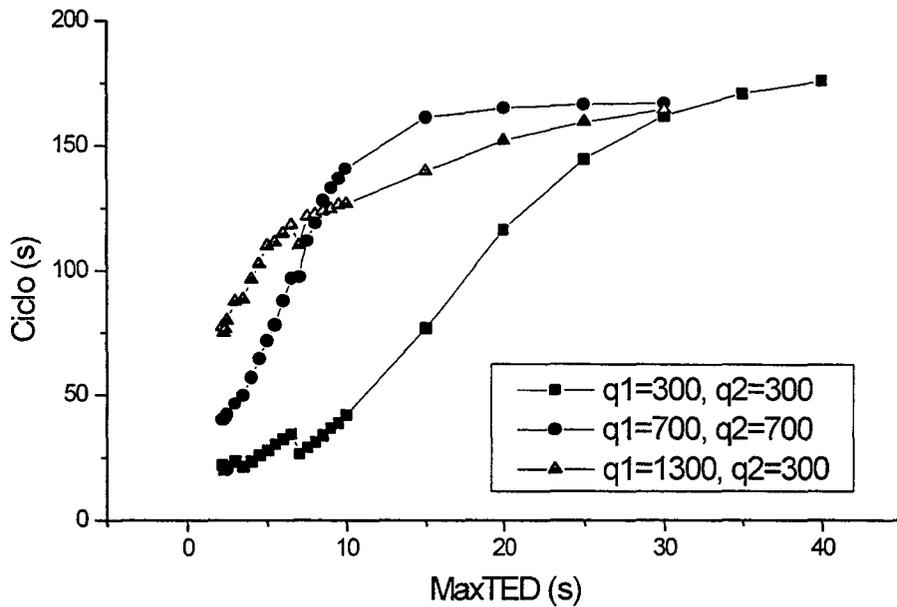


Figura 6-5 - Valores de fluxo em v.p.h. MaxTE = 80s.



**Figura 6-6 - Ciclo médio em função de MaxTED. Valores de fluxo em v.p.h.  
MaxTE = 80s.**

O parâmetro MaxTED foi investigado no intervalo de 2 a 40 segundos. O limite inferior de 2s corresponde ao headway de saturação. O limite superior de 40s foi considerado suficiente, visto que se aproxima da grandeza do próprio ciclo e que é bem maior do que o headway médio de fluxos baixos, da ordem de 12s para um fluxo de 300 v.p.h. por exemplo. Ambos os gráficos, nas figuras 6-5 e 6-6, apresentam três curvas correspondentes a diferentes valores de demanda,  $q_1/q_2$ , conforme respectivas legendas.

Os valores de MaxTED são sempre iguais para ambas as fases. Os outros parâmetros que definem o desempenho do controlador foram fixados de acordo com os seguintes valores:

- Dist1 = Dist2 = 9m, correspondendo a dois veículos entre o detetor e a linha de parada.
- MinTV = 7s, igual para ambas fases.
- MaxTE = 80s, igual para ambas as fases. Este valor foi selecionado por ser realista e por ser superior ao MaxTEo das demandas 300/300 e 700/700 - ver Figura 6-3. Porém, é inferior ao MaxTEo da demanda 1300/300. Isto é interessante como ilustração do que ocorre quando se usa um MaxTE abaixo do MaxTEo para uma determinada situação de demanda.

A Figura 6-5 apresenta a variação do *atraso total médio* (**D**) em função de MaxTED. A Figura 6-6 apresenta a variação do *ciclo médio* resultante em função de MaxTED. Na Figura 6-5, as três curvas iniciam em  $\text{MaxTED} = 2s$ , resultando num valor de atraso tendendo ao infinito. Rigorosamente falando, de acordo com a teoria de funcionamento do CCR implementado, as curvas deveriam tender ao infinito apenas para valores de  $\text{MaxTED} < 2s$ . Isto porque, nesta condição, a extensão do tempo de verde se tornaria impossível, uma vez que  $2s$  é o mínimo tempo possível entre detecções. Todas as detecções ocorreriam em intervalos superiores ao MaxTED, de forma que o controlador manteria o verde por, no máximo, o tempo mínimo de verde acrescido de um MaxTED. No entanto, devido a imperfeições do modelo, o atraso tende ao infinito já para valores de MaxTE tendendo a  $2s$  pela direita. Este pequeno erro não chega a comprometer em nada o valor da análise, pelo contrário, ajuda a simular o caso real. No tráfego real, o valor de MaxTED para o qual o atraso médio cresceria indefinidamente, não é tão preciso assim, isto é, não é um valor tão bem conhecido quanto os  $2s$  verificados na simulação. Isto porque, no tráfego real, o *headway* de descarga dos veículos é uma variável aleatória.

Ainda com relação à Figura 6-5, à medida que MaxTED cresce, o atraso cai bruscamente, passando por um mínimo e voltando a crescer a taxas tanto mais elevadas quanto maior for a demanda. O ciclo por sua vez cresce e se estabiliza num determinado valor aproximadamente igual para as três demandas - ver Figura 6-6.

As curvas das figuras 6-5 e 6-6 estão inteiramente relacionadas. A título de entendimento do comportamento do atraso mostrado na Figura 6-5, vale a pena lembrar dos resultados de Webster para o atraso em sistemas de ciclo fixo. A diferença básica entre o CCR e o ciclo fixo, no que se refere aos mecanismos de determinação do atraso, está no fato de que, no primeiro, o tamanho de cada fase e do ciclo são variáveis, mas, uma vez que estes parâmetros estejam determinados, o raciocínio para o entendimento do atraso é basicamente o mesmo. Com relação ao pré-temporizado, sabe-se, por exemplo, que se o ciclo for maior do que o ótimo, a tendência é que o atraso aumente. Basicamente porque se tem mais tempo de verde do que o necessário e, conseqüentemente, mais tempo de espera devido a tempos de vermelhos mais longos. Este raciocínio não deixa de ser verdadeiro para o CCR. Portanto, um ponto chave para o entendimento da relação entre o atraso e o MaxTED é o entendimento da relação entre o ciclo e MaxTED.

Para uma dada demanda, ver Figura 6-6, o ciclo cresce com o aumento de MaxTED, porque, para valores maiores de MaxTED, o sistema se torna mais tolerante no que se refere à finalização da fase corrente. Em outras palavras, a probabilidade de ocorrência de um intervalo entre detecções maior do que o MaxTED diminui com o aumento de

MaxTED. Consequentemente, a probabilidade de finalização de uma fase, cada vez que se cronometra o MaxTED, se torna menor. O valor esperado de cada fase aumenta e, consequentemente, o ciclo médio resultante também aumenta. Finalmente, o ciclo tende para um valor máximo, que é limitado de maneira não determinística pelo MaxTE. Observe, na Figura 6-6, que as curvas de todas as três demandas convergem aproximadamente para o mesmo valor máximo de ciclo, que corresponde a aproximadamente 160s. Esse valor é aproximadamente  $2 \cdot \text{MaxTE}$ , ou seja, sugere que cada uma das duas fases alcança um tempo igual a MaxTE. Observe que a curva de demanda 300/300 atinge um valor um pouco maior e parece continuar ainda crescendo. Isto se deve ao fato de que o  $\Delta_A$  e  $\Delta_B$  são maiores para o nível de demanda 300/300 do que para os outros níveis de demanda. Sendo assim, as fases são maiores e consequentemente o ciclo é maior.

Na Figura 6-5, nota-se que o atraso também tende a se estabilizar, para valores grandes de MaxTED. A explicação mais razoável, para o autor, é que isto se deve a estabilização das fases de cada rua, uma vez que o mecanismo de definição do atraso está diretamente ligados ao tamanho das fases, como é sabido dos resultados de Webster para sistemas de ciclo fixo.

Para finalizar algumas recomendações úteis para projetos deste tipo de sistema podem ser extraídas da Figura 6-5. A referida figura mostra que existe um valor de MaxTED para o qual o atraso total médio é mínimo, mas que se encontra numa região bastante instável. Como no tráfego real o *headway* de descarga é uma variável não determinística, podendo na média ser maior do que se espera, recomenda-se selecionar um valor de MaxTED suficientemente maior para promover a estabilidade, mas que não penalize exageradamente o desempenho do sistema. Certamente, ajustes devem se fazer necessários após a instalação. Se acontecer de o *headway* de descarga médio ser maior do que o MaxTED, atrasos grandes ocorrerão.

## 6.5 Comparação de Desempenho entre o CCR e o Sistema Pré-temporizado

A fim de realizar a referida comparação, o modelo MSCI foi equipado e simulado primeiramente com um sistema pré-temporizado de controle dos semáforos. Posteriormente, o MSCI foi equipado com o sistema CCR apresentado nas seções anteriores. Decidiu-se confrontar o desempenho dos dois sistemas frente a várias situações de demanda. Esta pareceu a decisão mais lógica, visto que, ao instalar um

destes sistemas, espera-se que ele apresente um bom desempenho frente às várias alternâncias de demanda que ocorrem durante todo o dia numa dada interseção.

O *layout* da interseção modelada é o mesmo utilizado para a análise do CCR, ilustrado na Figura 6-2. Os tempos de amarelo e vermelho de segurança foram ajustados em 3 e zero segundos respectivamente, iguais para os dois sistemas. Os outros detalhes da configuração dos dois sistemas são assim estabelecidos:

- Pré-temporizado:
  - O *split* é feito na proporção da relação  $Y=q/s$  de cada fase.
  - Para cada situação de demanda, o ciclo é ajustado de acordo com o ciclo ótimo de Webster, como se o sistema pré-temporizado tivesse a capacidade de medir a demanda e ajustar o ciclo para o valor ótimo em tempo real. Portanto, o sistema funciona em sua melhor condição para cada situação de demanda simulada. Sabe-se que os sistemas pré-temporizados não funcionam assim na prática. Esta suposição foi feita justamente para que o CCR fosse comparado com um sistema muito bom. No entanto, deve-se ter em mente que o desempenho do sistema de ciclo fixo não é tão bom quanto o que está sendo considerado para esta comparação.
  
- CCR:
  - $Dist1 = Dist2 = 9m$ .
  - $MinTV = 7s$ , igual para as duas fases.
  - $MaxTED = 4s$ , igual para as duas fases.
  - $MaxTE = 80s$ ; igual para as duas fases.

Os parâmetros do CCR são fixados em valores considerados realistas e permanecem invariáveis para todas as demandas, o que corresponde ao modo de operação real de um CCR básico.

Os resultados das simulações estão mostrados nas figuras de 6-7 a 6-12. Cada gráfico possui várias curvas correspondentes a diferentes valores de fluxo na rua 2,  $q_2$ , e a cada um dos sistema de controle, como pode ser verificado pelas legendas dos gráficos. Isto permite uma comparação direta entre os dois sistemas.

Os mesmos resultados são plotados duas vezes, uma em função de  $q_1$  e outra em função da demanda total  $q_1+q_2$ . Por exemplo, a Figura 6-7 apresenta o atraso total médio em função de  $q_1$  e a Figura 6-8 apresenta os mesmos dados de atraso em função do fluxo total  $q_1+q_2$ . O objetivo é fornecer dois pontos de vista para uma melhor percepção da dependência entre as variáveis.

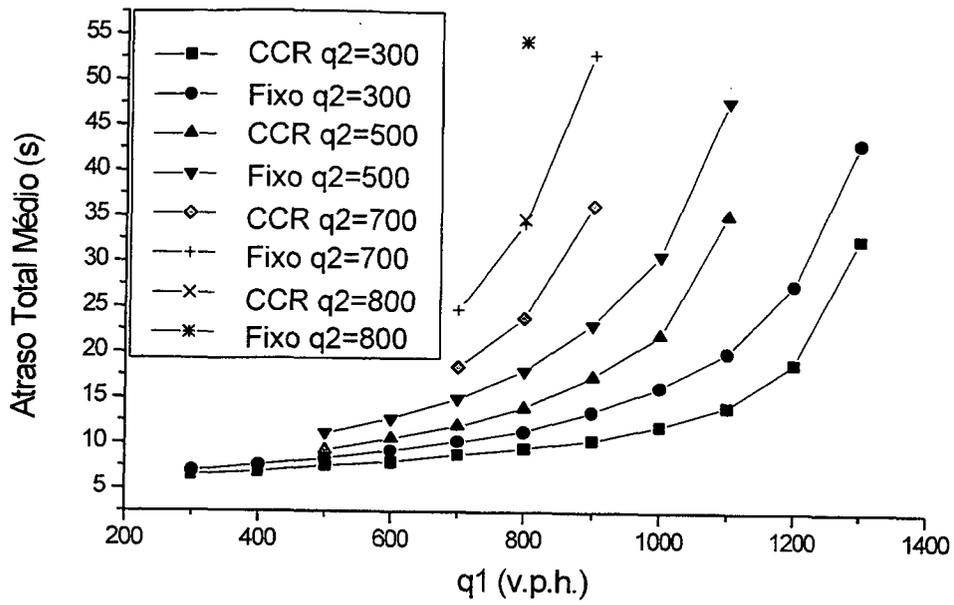


Figura 6-7 - Atraso total médio em função de  $q_1$ .  $q_2$  dado em v.p.h.

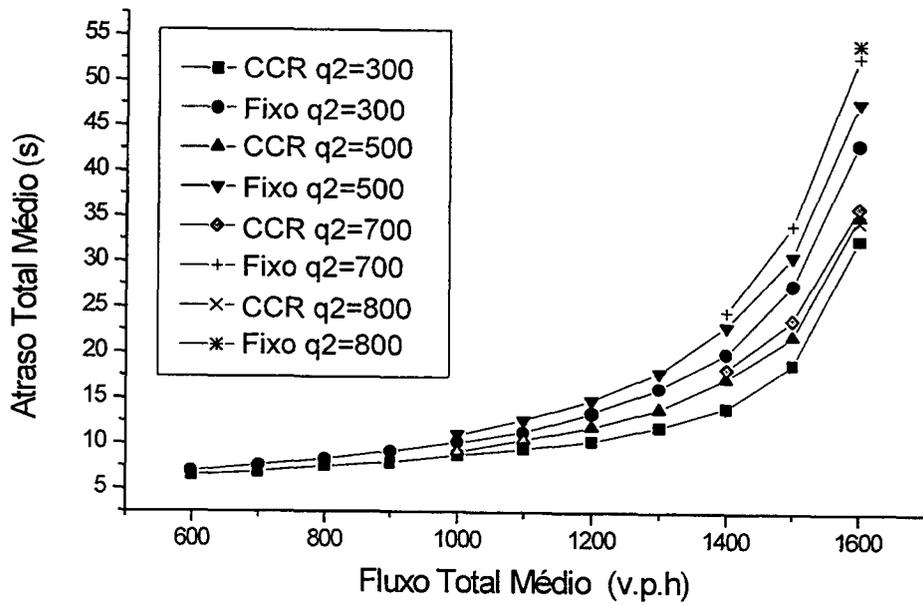


Figura 6-8 - Atraso total médio em função de  $q_1+q_2$ .  $q_2$  dado em v.p.h.

Devido à simetria do problema com relação aos fluxos em cada rua - o atraso é o mesmo tanto para  $q_1/q_2 = 300/600$  como para  $q_1/q_2 = 600/300$  - convencionou-se que  $q_1$  é sempre maior do que  $q_2$ . Isto foi feito para economizar tempo de simulação. Portanto, nas figuras 6-7 a 6-12, para as curvas  $q_2 = 300$  v.p.h.,  $q_1$  varia de 300 v.p.h. a 1300 v.p.h.. Para as curvas  $q_2 = 500$  v.p.h.,  $q_1$  varia de 500 v.p.h. a 1100 v.p.h.. Já para as curvas  $q_2 = 800$  v.p.h., só existe um ponto,  $q_1 = 800$  v.p.h.. Desta forma, o fluxo total  $q_1 + q_2$  está limitado a 1600 v.p.h.

As figuras 6-7 e 6-8 mostram que o CCR apresenta um desempenho melhor do que o pré-temporizado para todas as combinações de demanda verificadas. Mesmo sendo o pré-temporizado dotado de uma capacidade hipotética, que é o fato de está sempre funcionando em condição ótima. Na Figura 6-7, por exemplo, verifica-se que as curvas do CCR estão sempre abaixo das curvas de mesmo  $q_2$  do pré-temporizado. Além disto, observe que o atraso promovido pelo CCR para  $q_1 = q_2 = 800$  v.p.h. é igual ao atraso promovido pelo pré-temporizado para a demanda  $q_1 = 800$  v.p.h. e  $q_2 = 700$  v.p.h.. Ou seja, o CCR consegue manter o mesmo atraso para um fluxo  $q_2$  de 100 v.p.h. a mais.

Na Figura 6-8, a diferença entre as quatro curvas referentes ao CCR é a distribuição do fluxo total entre as ruas 1 e 2. Idem para as curvas do pré-temporizado. Em relação as curvas do CCR, observe que elas estão bem próximas umas das outras, quase sobrepostas, exceto a curva  $q_2 = 300$  v.p.h.. Isto significa que o fluxo total,  $q_1 + q_2$ , tem mais influência sobre o atraso total médio do que a forma como este fluxo está distribuído entre as duas ruas. No entanto, quando o desequilíbrio de fluxos entre as duas ruas é grande - veja curva  $q_2 = 300$  v.p.h. no intervalo de fluxo total que vai de 1200 a 1500 v.p.h. - o desempenho do CCR é sensivelmente melhor do que na condição de fluxo equilibrado.

Outra conclusão que se pode tirar das figuras 6-7 e 6-8 diz respeito à robustez do CCR. Como foi dito antes, de uma situação de demanda para outra, nenhuma alteração nos parâmetros do CCR foi feita. Esta é a forma como este sistema opera na prática. Mesmo assim, o sistema apresentou um desempenho muito bom, melhor do que o sistema pré-temporizado funcionando sempre em condição ótima. O CCR ajusta automaticamente os tempos de verde de cada fase de acordo com a demanda corrente em tempo de operação, sem interferência de operador humano, buscando reduzir os tempos mortos e elevando a capacidade da interseção.

Outra grande vantagem do sistema CCR pode ser observada nas figuras 6-9 e 6-10, onde estão plotados os resultados do atraso na rua de menor fluxo, que é a rua 2:

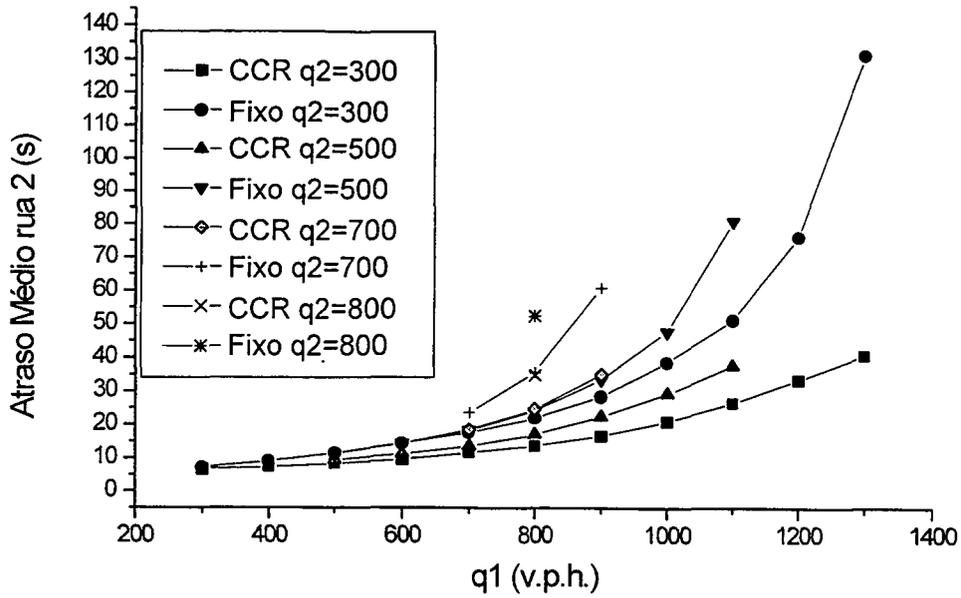


Figura 6-9 - q2 dado em v.p.h.

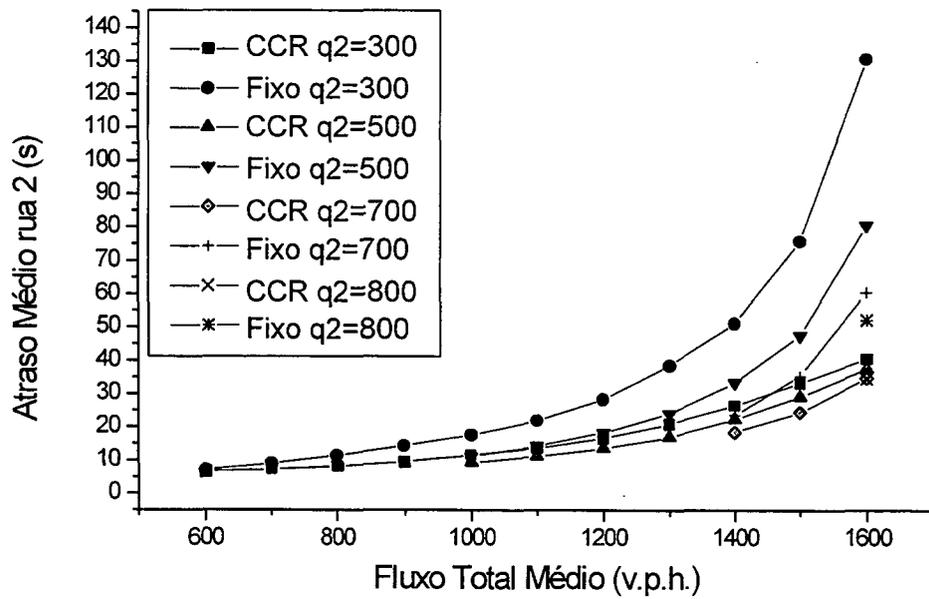


Figura 6-10 - q2 dado em v.p.h.

O sistema pré-temporizado penaliza de forma exagerada a rua de menor fluxo em favor na rua de maior fluxo. Já o CCR mantém o atraso na rua 2 em níveis bem mais baixos, comparáveis ao atraso total médio. Na Figura 6-9 pode-se verificar que

mesmo a curva  $q_2 = 500$  v.p.h. do CCR está abaixo da curva  $q_2 = 300$  v.p.h. do pré-temporizado. O desequilíbrio de demandas afeta bastante o atraso da rua de menor fluxo no caso do pré-temporizado. Já no caso do CCR, este feito é mais ameno.

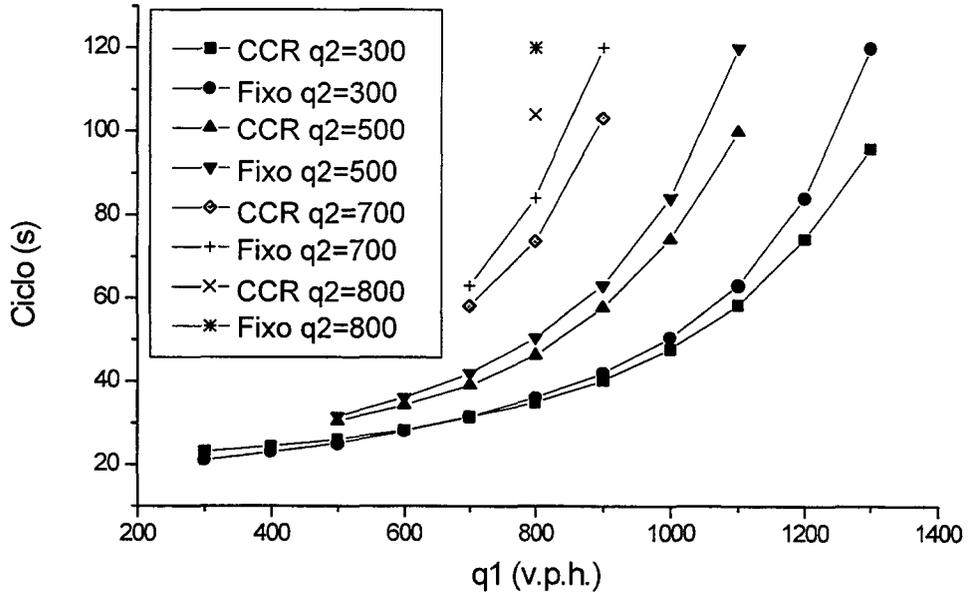


Figura 6-11 -  $q_2$  dado em v.p.h.

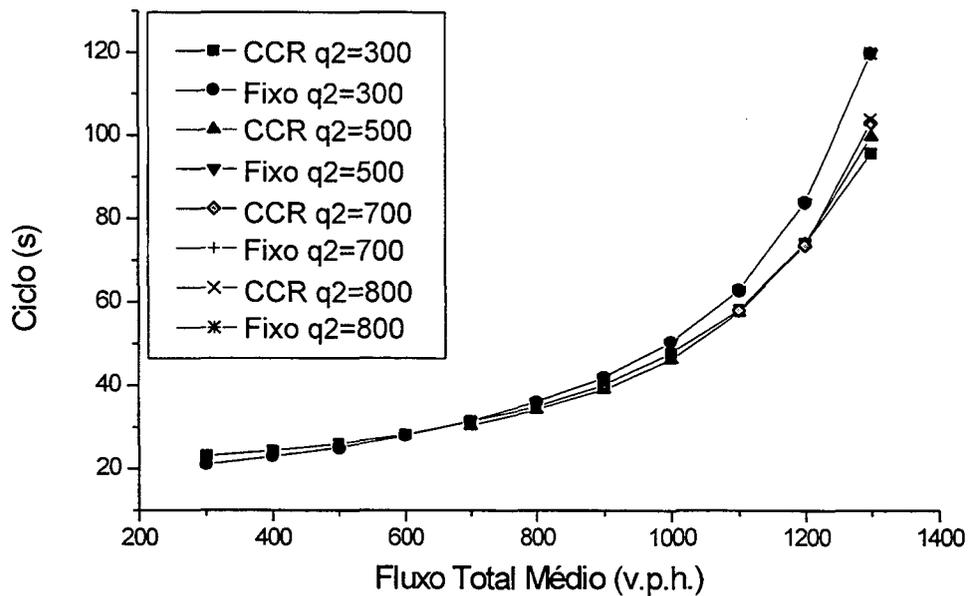


Figura 6-12 -  $q_2$  dado em v.p.h.

As figuras 6-11 e 6-12 trazem alguns resultados interessantes. Para esta configuração específica, o ciclo médio resultante da operação do CCR tende a acompanhar o ciclo ótimo de Webster para valores mais baixos de demanda e tende a divergir para valores mais altos de demanda. O afastamento das curvas ocorrem mais acentuadamente para as regiões do gráfico onde o desequilíbrio de demanda é maior. A divergência para valores altos de demanda ocorre, neste caso, devido à limitação imposta pelo parâmetro MaxTE. Nas situações de demanda desequilibrada, por exemplo a curva onde  $q_2 = 300$  v.p.h., a fase que possui o menor fluxo não consegue aproveitar plenamente o MaxTE, sendo assim, o ciclo médio do CCR fica ainda mais limitado, o que faz com que a divergência com relação ao ótimo de Webster aumente.

A Figura 6-12 apresenta dois resultados, um deles conhecido e o outro ainda desconhecido. O resultado já conhecido é que o ciclo ótimo, para o sistema pré-temporizado, é uma função da demanda total e não das demandas individuais de cada rua, como pode ser verificado pela equação 4-11. O resultado não conhecido é que, no caso do CCR, o ciclo médio resultante também parece ser uma função da demanda total e não dos fluxos individuais. Observe que as curvas do ciclo médio do CCR em função do fluxo total estão sobrepostas.

As análises apresentadas acima só permitem concluir a respeito do desempenho do CCR configurado com os valores dos parâmetros descritos no início desta seção. Com outros valores de MaxTE, MaxTED e MinTV, o desempenho do CCR se altera e pode vir a ser pior. No entanto, os valores utilizados são razoavelmente realistas, podendo-se presumir que esta será aproximadamente a tendência de um sistema real deste tipo.

Estas análises mostram que o CCR pode fornecer uma vantagem realmente competitiva em comparação com os sistemas de ciclo fixo convencionais. No entanto, cabe ressaltar que testes em campo são necessários para que tal afirmativa possa ser confirmada, visto que o desempenho deste sistema depende fortemente do comportamento dos condutores durante a descarga das filas e da forma como os movimentos se processam nas proximidades dos detetores. Por outro lado, se o comportamento original dos condutores se mostrar desvantajoso inicialmente, pode-se recorrer à reeducação dos condutores mostrando as vantagens de se agir apropriadamente, de tal forma que as vantagens do CCR possam ser resgatadas.

## 6.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados de maneira resumida alguns métodos de controle em malha fechada. A especificação de um destes métodos, que foi denominado de

Controle Completamente Realimentado (CCR), foi apresentada em detalhes. O objetivo principal do capítulo foi o de apresentar os resultados de desempenho deste sistema bem como compará-lo com o sistema pré-temporizado. Para tanto, ambos os controladores foram implementados no modelo MSCI apresentado no capítulo 5. Como resultado da comparação, chegou-se a conclusão de que o CCR, no que se refere ao critério do atraso e robustez, é uma alternativa vantajosa para o controle de interseções isoladas. Existe porém a ressalva de que este resultado deve ser verificado experimentalmente, principalmente devido à incerteza sobre o comportamento dos condutores dos veículos nas proximidades dos detetores, pois, como foi visto, o desempenho deste sistema está intimamente relacionado ao tempo entre detecções de veículos, que depende da atitude dos condutores.

# Conclusão Final

---

---

O uso da simulação como ferramenta de projeto e planejamento tem sido importante desde há muito tempo. Vários estudos têm demonstrado que a fase de projeto e planejamento em várias áreas, tanto em engenharia como em negócios, é fundamental para a redução de custos e para o sucesso do produto final. Todos sabem que os japoneses ganharam terreno na indústria moderna, e um dos fatores que tem contribuído para esta performance é justamente sua metodologia de desenvolvimento que põe ênfase na fase de planejamento.

A simulação, que pode ser aplicada nos mais diversos setores de pesquisa e engenharia, é efetivamente uma ferramenta de planejamento, uma vez que produz informações valiosas para o processo de tomada de decisão. É verdade que os modelos de simulação, assim como qualquer outro modelo, carregam algum grau de imperfeição. No entanto, a adoção de uma metodologia criteriosa ([6] e [8]) e o conhecimento sobre o assunto e a ferramenta de simulação utilizada, podem reduzir a níveis confortáveis o grau de erro inerente, fazendo com que os resultados das análises por simulação sejam realmente úteis em situações reais.

Falando especificamente sobre o controle de tráfego, a falta de uma ferramenta que traga à luz alguma previsão sobre o comportamento do sistema estudado, geralmente sistemas complexos, faz com que os decisores, não raras as vezes, cometam os seguintes erros:

- Desistam da implementação de um projeto que poderia promover satisfação e melhoria da qualidade de vida da sociedade, devido à incerteza sobre o sucesso e à pequena margem de tolerância disponível para erros, visto que as somas de dinheiro envolvidas são altas.
- Decidam pela implementação de um sistema, baseando-se em estudos incompletos ou experiências anteriores, que não produz o resultado esperado.

O esforço empregado neste trabalho, ao longo de pouco mais de 1 ano - 01/12/97 a 20/12/98 - teve por finalidade produzir algo que pudesse efetivamente contribuir para o aprimoramento da metodologia de planejamento e projeto de controladores de tráfego. O trabalho consistiu no desenvolvimento de um modelo de simulação para

controladores realimentados de interseções isoladas. O processo de desenvolvimento adotado pode ser resumido da seguinte forma:

- **Revisão bibliográfica:** Nesta fase buscou-se ler uma literatura clássica da área de controle de tráfego, principalmente livros ([3] e [5]), manuais ([2] e [4]) e o artigo original de Webster (1958) [1].
- **Aprendizado sobre a ferramenta de simulação:** O material lido foi basicamente as referências [6], [7] e [8]. Nesta fase buscou-se o aprendizado da ferramenta AUTOMOD®, já implementando alguns conceitos básicos que mais tarde integraram o modelo final.
- **Implementação do modelo MSCI:** Esta etapa e a etapa anterior em parte ocorreram juntas. O modelo ia sendo implementado, testado e modificado à medida que o conhecimento sobre a plataforma de desenvolvimento se tornava mais maduro. Além disto, o próprio modelo conceitual de comportamento dos condutores de veículo no tráfego foi reavaliado algumas vezes.
- **Validação do modelo MSCI:** A quantificação do atraso fornecida pelo modelo MSCI foi comparada com os valores gerados pelo modelo analítico de Webster, que é considerado, por vários pesquisadores, como um padrão para avaliação de modelos de previsão de atraso em interseções isoladas sinalizadas [2]. Deste confronto se concluiu que o modelo MSCI produz um resultado coerente com o resultado de Webster.
- **Implementação e análise de desempenho do CCR:** A especificação de um controlador completamente realimentado clássico (CCR) foi extraída das referências [4] e [5]. Este controlador foi implementado no modelo MSCI, que havia sido previamente validado na fase anterior. Posteriormente, uma série de simulações foram feitas com o objetivo de avaliar o desempenho do CCR frente a alterações em sua configuração, ou seja, variou-se os parâmetros MaxTE e MaxTED e registrou-se as alterações no atraso dos veículos. De posse de um melhor entendimento sobre o comportamento do CCR, e conhecendo-se a configuração que fornece o melhor desempenho, realizou-se uma comparação deste controlador com o sistema pré-temporizado. Concluiu-se, entre outras coisas, que o controlador realimentado possui características de robustez de desempenho frente a variações na demanda de tráfego. Além disso, apresenta melhor desempenho do que o sistema pré-temporizado em todo o domínio de demandas analisado.

Entre as contribuições resultantes deste trabalho destacam-se:

- **O modelo conceitual de comportamento do tráfego e o modelo implementado:** O MSCI é um modelo que incorpora hipóteses de chegada de veículos e descarga de filas, além de assumir um *layout* para a interseção, mas não restringe o tipo de controlador da interseção. Sendo assim, o MSCI é uma espécie de base sobre a qual se pode implementar e simular os mais diversos tipos de controlador para interseções isoladas. Além do mais, a própria plataforma sobre a qual o MSCI foi construída, o AUTOMOD<sup>®</sup>, oferece recursos bastante extensos para mudanças radicais do próprio modelo MSCI e para a implementação de sistemas de interseções mais complexos. Ainda assim, o modelo conceitual de comportamento do tráfego utilizado no MSCI poderia ser aproveitado.
- **O conhecimento específico gerado sobre o controlador CCR:** Parte dos resultados das análises apresentadas no capítulo 6, sobre o controlador CCR, pode ser diretamente aplicada no projeto, implementação e ajuste de controladores desta natureza. Além disto, a comparação de desempenho com o sistema pré-temporizado faz, também, parte de uma etapa que provavelmente teria que ser cumprida por um projetista que estivesse estudando a possibilidade de implementação de um controlador realimentado. Sendo assim, a comparação apresentada no capítulo 6 também representa uma contribuição importante.
- **Experiência da utilização de um simulador não específico para controle de tráfego:** A oportunidade proporcionada por este trabalho provou ser possível e relativamente fácil a utilização de um simulador de SED's (Sistemas a Eventos Discretos) em controle de tráfego, pelo menos no que se refere às interseções isoladas. Simuladores desta natureza oferecem recursos de programação que tornam possível a implementação de algoritmos complexos de controle.
- **Valor didático da obra:** Espera-se que esta dissertação possa ser efetivamente utilizada com material de consulta para aqueles que se interessem pelo assunto. Certamente a clareza e a profundidade com que certos tópicos são tratados deixam a desejar. No entanto, para os que necessitam ter apenas uma visão rápida e introdutória sobre controle de interseções, que é o caso dos futuros candidatos à continuação desta linha de pesquisa no DAS, acredita-se que os capítulos de 2 a 5 possam ter algum valor.

Para finalizar, alguns comentários sobre os possíveis futuros passos que poderiam ou deveriam ser dados como continuação deste trabalho merecem ser colocados, o que é feito de forma enumerativa:

- Avaliação das ferramentas já existentes no mercado para dimensionamento e análise de controle de tráfego.
- Levantamento do estado da arte em controle de Sistemas em Rede Fechada. Pelo que se pôde concluir das conversas informais com profissionais da área, de congressos e de alguma literatura extra lida, este o tema principal de pesquisa nesta área atualmente. Pelo indicativo que se tem hoje, os esforços atuais e futuros deveriam convergir para a ampliação da competência neste tema.
- Há também muito trabalho a ser feito em *hardware*, *software*, redes, mídia, banco de dados, sistemas inteligentes e metodologia de projeto, implementação e coordenação de informações aplicados a controle de tráfego.

Além da singela contribuição técnica e científica, o autor espera sinceramente ter cumprido um papel social com a realização deste trabalho. Espera que através de suas atitudes, da maturidade adquirida, e através do conhecimento absorvido e transmitido a outros futuramente, possa colocar mais um tijolo nesta obra que é construir um país melhor.

# Referências

---

---

- [1] - Webster, F. V., Traffic Signal Settings. Road Research Laboratory Technical Paper No. 39. London, 1958.
- [2] - Gerlough, D. L. e Huber, M. J. , *Traffic Flow Theory, a Monograph*. National Research Council Special Report 165, Transportation Research Board, Washington D.C., 1975.
- [3] - Ashton, Winifred D., *The Theory of Road Traffic Flow*. John Wiley & Sons Inc. N.Y., 1966.
- [4] - Wilshire, R., Black, R., Grochoske, R., and Higinbotham, J., *Traffic Control Systems Handbook - Revised Edition*. Institute of Transportation Engineers. Washington D.C., 1985.
- [5] - Wohl, M. and Martin, B. V., *Traffic Systems Analysis For Engineers and Planners*. McGraw-Hill Book Company. N.Y., 1967.
- [6] - Banks, J., Carson, J. S. and Nelson, L. B., *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall Inc. New Jersey, 1996.
- [7] - Automod™ User's Manual, Vol. 1, 2, 3 e 4. Autosimulation™ Inc. 1996.
- [8] - Martins, Carlos F., *Modelagem e Avaliação de Desempenho por Simulação de Sistemas de Transporte por AGVs: O Caso da EMBRACO*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Eng<sup>a</sup>. Elétrica. UFSC. Florianópolis, 1997.
- [9] - Kleinrock, L., *Queuing Systems, vol. 1: Theory*. Wiley, New York, 1975.
- [10] - Chen, C. H., An Effective Approach to Smartly Allocate Computing Budget for Discrete Event Simulation . Procedures of the 34th CDC, pp 2598-2603. New Orleans, 1995.

# Anexo A

Ciclo (s)	X	Atraso Total Médio					Atraso médio para a faixa de 700 v.p.h				Atraso médio para a faixa de 400 v.p.h			
		Webster (s)	MSCI (s)	Ia (s)	Erro (s)	Erro %	Webster (s)	MSCI (s)	Erro (s)	Erro %	Webster (s)	MSCI (s)	Erro (s)	Erro (%)
17	0,92	55,2	54,9	0,4	1,6	3,1	42,3	42,6	-0,4	-1,0	72,6	63,9	8,7	13,1
18	0,92	34,2	39,2	2,2	5,0	14,5	27,3	28,2	0,9	3,3	46,4	58,0	11,6	25,0
19	0,89	26,2	28,7	2,1	3,5	9,7	20,9	20,7	-0,2	-1,2	35,3	41,9	6,6	18,6
20	0,87	21,8	25,3	1,6	3,5	16,2	17,5	19,7	2,1	12,5	29,3	35,7	6,4	22,1
21	0,86	19,1	21,9	0,9	2,8	14,8	15,2	17,3	2,1	12,0	26,6	31,4	4,7	25,7
22	0,84	17,3	18,1	0,7	0,8	4,8	14,0	14,5	0,5	3,6	23,1	25,0	1,8	8,0
23	0,83	16,7	17,4	0,7	1,0	6,0	13,4	13,3	-0,1	-1,4	21,4	23,1	1,6	7,8
24	0,81	15,2	16,4	0,4	1,2	7,9	12,3	12,7	0,4	3,5	20,2	23,5	3,2	16,2
25	0,80	14,3	15,6	0,6	1,1	7,6	11,8	11,9	0,1	1,3	19,3	21,9	2,5	13,1
26	0,79	14,0	14,5	0,4	0,5	3,5	11,4	11,6	0,2	2,3	18,7	19,7	1,0	5,6
27	0,79	13,7	14,2	0,4	0,7	5,2	11,1	10,8	-0,2	-2,0	18,2	19,8	1,6	8,8
28	0,78	13,4	13,5	0,3	0,1	1,0	10,8	10,5	-0,3	-2,9	17,8	19,2	1,3	7,6
29	0,77	13,2	13,1	-0,3	-0,1	-0,6	10,6	10,2	-0,4	-4,3	17,6	18,4	-0,8	-4,7
30	0,76	13,0	13,4	0,3	0,4	2,8	10,5	10,2	-0,3	-3,0	17,4	18,8	1,4	8,5
31	0,76	12,9	12,9	0,3	0,0	-0,1	10,4	9,7	-0,7	-7,0	17,2	18,4	1,2	7,0
32	0,75	12,8	12,5	0,2	-0,3	-2,1	10,3	9,7	-0,6	-6,2	17,2	17,5	0,3	2,0
33	0,75	12,8	12,5	0,3	-0,3	-2,1	10,3	9,6	-0,6	-6,3	17,1	17,4	0,3	1,9
34	0,74	12,7	12,4	0,2	-0,4	-2,8	10,2	9,7	-0,5	-5,4	17,1	17,2	0,0	0,5
35	0,74	12,7	12,2	0,3	-0,3	-2,4	10,2	9,6	-0,6	-6,1	17,1	17,6	0,4	2,3
36	0,73	12,7	12,4	0,3	-0,3	-2,6	10,2	9,7	-0,5	-5,1	17,2	17,4	0,1	1,1
37	0,73	12,8	12,2	0,3	-0,3	-2,4	10,2	9,5	-0,6	-6,4	17,3	17,5	0,2	1,2
38	0,73	12,8	12,3	0,2	-0,5	-4,1	10,2	9,4	-0,7	-7,2	17,4	17,2	-0,1	-1,1
39	0,72	12,8	12,3	0,1	-0,6	-4,6	10,2	9,2	-0,7	-7,5	17,5	17,2	-0,2	-1,4
40	0,72	12,9	12,4	0,2	-0,5	-3,6	10,2	9,4	-0,8	-8,0	17,6	17,6	0,0	0,2
45	0,71	12,8	12,7	0,1	-0,6	-4,8	10,2	9,7	-0,7	-7,1	18,5	18,2	-0,3	-1,3
50	0,69	13,8	13,0	0,1	-0,8	-6,1	10,7	9,8	-0,9	-8,6	19,2	18,6	-0,5	-2,9
55	0,69	14,4	13,5	0,1	-0,9	-6,3	11,1	10,3	-0,8	-7,0	20,2	19,4	-0,8	-4,0
60	0,68	15,0	14,1	0,1	-0,9	-6,1	11,5	10,5	-1,0	-8,7	21,2	20,6	-0,6	-3,0
65	0,67	15,7	14,8	0,1	-0,9	-6,3	11,9	11,0	-0,9	-8,1	22,3	21,5	-0,8	-3,7
70	0,67	16,4	15,4	0,1	-1,0	-6,0	12,4	11,3	-1,0	-8,6	23,5	22,4	-1,0	-4,5
75	0,66	17,1	16,2	0,2	-0,9	-5,4	12,8	11,9	-0,9	-7,3	24,6	23,9	-0,7	-3,4
80	0,66	17,9	16,8	0,1	-1,0	-5,7	13,3	12,2	-1,0	-8,1	25,8	24,6	-1,2	-4,8
85	0,66	18,6	17,5	0,1	-1,1	-5,7	13,8	12,9	-0,8	-6,4	27,0	25,9	-1,0	-4,0
90	0,65	19,3	18,4	0,2	-0,9	-4,9	14,3	13,4	-0,8	-6,3	28,2	27,4	-0,8	-2,9
Média =				0,0	-0,2				-0,4	-3,8			0,0	1,4

**Tabela A-1 - Resultados numéricos da comparação entre o MSCI e a fórmula completa de Webster. Define-se Erro como: Atraso do MSCI - Atraso de Webster. Erro% = Erro/Atraso de Webster. A incerteza Ia é apresentada apenas para o Atraso Total Médio por veículo.**