



Universidade Estadual de Londrina

Wagner Endo

**Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano baseado em
Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição de Estágio**

**LONDRINA
2006**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano baseado em
Otimização de Ciclo, Defasagem e
Distribuição de Estágio**

Dissertação submetida à
Universidade Estadual de Londrina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Wagner Endo

Londrina, Dezembro de 2006.

Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano baseado em Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição de Estágio

Wagner Endo

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Simulação de Sistemas*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina.’

Silvia Galvão de Souza Cervantes, Dr
Orientadora

Prof. Taufik Abrão, Dr
Coordenador do Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Werner Kraus Junior, PhD - UFSC

Prof José Alexandre de França, Dr - UEL

Prof Robinson Hoto, Dr - UEL

À minha amada, Thaís, aos meus queridos pais, Antonio e Marilucia, e aos irmãos Evandro e Viviane, pois são desses toda a fonte de minhas forças.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que está acima de todos nós e que me acompanhou em mais esta caminhada.

À minha querida esposa Thaís Celi pela força que sempre representou, pelo apoio, carinho e paciência.

À minha orientadora Sílvia pela paciência, compreensão, dedicação e apoio.

Aos meus pais, Antonio e Marílúcia, pelo apoio incondicional e aos meus queridos irmãos, Evandro e Viviane, dos quais orgulho muito.

Aos colegas de trabalho e ao meu mentor Jilo Yamazaki pelo apoio e compreensão e a todos que colaboraram, diretamente ou indiretamente, e não impediram a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à UEL como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano baseado em Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição de Estágio

Wagner Endo

Dezembro/2006

Orientadora: Silvia Galvão de Souza Cervantes

Área de Concentração: Controle, Automação, Informática Industrial e Simulação de Sistemas

Palavras-chave: Controle Semafórico em Tempo Real, Tráfego Urbano, Otimização, SCOOT

Número de Páginas: 75

Os sistemas viários influenciam a vida das pessoas todos os dias, direta ou indiretamente. Esta influência pode ocorrer por atraso veicular e paradas, acidentes, poluição sonora e atmosférica e consumo de combustíveis. Este estudo busca a melhoria da circulação de tráfego em redes viárias semaforizadas através da otimização dos tempos semafóricos.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo de controle atuado que responde automaticamente às variações de demanda do tráfego. O sistema é implementado tendo como base a estratégia SCOOT. Para este trabalho foi desenvolvido um algoritmo de controle, a partir de um modelo de geração e detecção de veículos, e as matrizes de filas. O algoritmo proposto calcula os tempos otimizados para descarga de veículos. Diante da falta de opções e recursos que as prefeituras brasileiras enfrentam para solucionar problemas de controle de tráfego, este trabalho torna-se uma etapa de um estudo que pretende suprir tais necessidades. O algoritmo é a primeira etapa de um sistema de baixo custo, aplicado à realidade nacional

Abstract of Thesis presented to UEL as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master) in Electrical Engineering.

Algorithm for Urban Traffic Control based in Cycle, Offset and Split Optimization

Wagner Endo

December, 2006

Silvia Galvão de Souza Cervantes: Name of the advisor

Area of Concentration: Control, Automation, Industrial Computing and Simulation Systems

Key words: Real Time Signal Control, Urban Traffic, Optimization, SCOOT

Number of Pages: 75

The road systems influence people's life everyday, directly or indirectly. This influence can happen for vehicle delay and time delayed stops, accidents, sonorous and atmospheric pollution and fuels consumption. The purpose of this study is to improve the performance of traffic systems, through optimization of the signals times in signals groups of intersections.

The purpose of this paper is based in control adaptive algorithm that responds automatically to the variations of traffic demand. The system has been implemented in SCOOT strategy. This research has developed algorithms from the models of generation of vehicles, detection system and matrices of queues. Ahead of the few options and resources that the Brazilian city halls face to solve problems of traffic control, this work becomes a stage of a study that it intends to supply such necessities. The proposed algorithm calculates the optimized time to unload vehicles. The algorithm is a step of a study that pretends to cover the necessity of the technological market with low costs and adapted to the nacional reality.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Definição do Problema	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização dos Capítulos	3
2	Fundamentação Teórica	4
2.1	Conceitos em Engenharia de Tráfego	4
2.1.1	Redes Viárias	4
2.1.2	Fluxos Veiculares	5
2.1.3	Elementos de Engenharia e Controle de tráfego	6
2.2	Tipos de Controle Semafórico	7
2.2.1	Tempo Fixo	7
2.2.2	Controle Atuado	8
2.3	Otimização	8
2.4	Coordenação e interação entre interseções	10
2.5	Modelos de Formação de Filas	10
2.6	Critério de Desempenho	13
2.6.1	Atraso	13
2.6.2	Número de Paradas	15
2.7	Conclusões	15

3	Revisão Bibliográfica	17
3.1	Características e Estratégias de Controle de Modelos de Tráfego	17
3.1.1	TRANSYT	20
3.1.2	TRANSYT-AUT	24
3.1.3	MAXBAND	24
3.1.4	SCATS	25
3.1.5	PRODYN	26
3.2	Classificação e Comparativo entre as Estratégias de Controle	27
3.2.1	Critério de Desempenho	27
3.3	Conclusões	28
4	Estudo do Modelo de Tráfego Baseado na Estratégia SCOOT	29
4.1	Modelo de Tráfego SCOOT	29
4.2	Estrutura Básica do SCOOT	30
4.3	Sistema de Detecção	30
4.4	Perfil Cíclico de Fluxo - <i>CFP</i>	33
4.4.1	Modelo de Fila	34
4.4.2	Carga e Descarga de Veículos	34
4.5	Modelos de Otimização da Estratégia SCOOT	36
4.5.1	Otimização de <i>Split</i> - Tempo de Verde	37
4.5.2	Otimização de <i>Offset</i> - Defasagem de tempo	37
4.5.3	Otimização de Ciclo	38
4.6	Conclusões	39
5	Modelo de Simulação e Controle de Tráfego Proposto	40
5.1	Modelo de Tráfego e de Tempos Semafóricos	40
5.2	Geração de Veículos	41
5.3	Sistema de Detecção	43

5.4	Algoritmos de Controle	44
5.4.1	Controlador de Distribuição de Verde	44
5.4.2	Controlador de Defasagem	46
5.4.3	Controlador de Ciclo	47
5.5	Matriz de Filas	48
5.6	Conclusões	49
6	Resultados e Discussões	50
6.1	Resultados de Simulação	50
6.1.1	Controlador de <i>Split</i>	50
6.1.2	Controlador de Defasagem	52
6.1.3	Controlador de Ciclo	54
6.2	Comparações entre o Modelo Proposto e o TRANSYT	54
6.3	Comparações para Distribuições Pulsadas e Aleatórias	57
6.4	Conclusões	58
7	Conclusões e Perspectivas para Trabalhos Futuros	59
7.1	Conclusões	59
7.2	Perspectivas	60
A	Publicação e Apresentação	61
B	Algoritmos	62
B.1	Algoritmo do Modelo Proposto	62
C	Configuração do sistema TRANSYT	72

Lista de Figuras

2.1	Representação de uma Interseção e 4 vias.	5
2.2	Exemplo de um ciclo com sua divisão entre estágios.	7
2.3	Diagrama de Blocos do Processo de formulação e validação de um modelo matemático.	9
2.4	Formação e Descarga de Filas.	11
2.5	Fila horizontal (adaptada de [30])	12
2.6	Componentes da formação do atraso (adaptado de [32].)	14
2.7	Componentes da formação do atraso sobre-saturado.	14
3.1	Atraso médio veicular de uma faixa	19
3.2	Modelo TRANSYT	21
3.3	Exemplo de um Perfil de Fluxo Cíclico	21
3.4	Exemplo de um PFC, <i>IN-profile</i>	22
3.5	Exemplo de um PFC, <i>GO-profile</i>	22
3.6	Exemplo de um PFC, <i>OUT-profile</i>	23
3.7	Sistema utilizado pelo SCATS.	26
3.8	PRODYN - Coordenação implícita	27
4.1	Estrutura do SCOOT (adaptada de [24])	31
4.2	Vetor do Sistema de Detecção SCOOT	31
4.3	Atribuição de valores em LPU	32
4.4	Um intervalo congestionado	33
4.5	Detecção para o CFP	33

4.6	<i>Vega Profile</i> - Modelo SCOOT	35
4.7	Modelo de Formação e Descarga de Fila - Modelo SCOOT	36
5.1	Grafo da rede de tráfego com 3 interseções.	41
6.1	Graus de saturação da interseção 1 com todo o conjunto de tomada de decisão.	51
6.2	Fila na via 2 - Controlador de <i>Split</i>	52
6.3	Fila na via 5 - Controlador de <i>Split</i>	53
6.4	Fila na via 1 - Otimizador de Ciclo - $C_1=40s$	54
6.5	Fila na via 1 - Otimizador de Ciclo - $C_1=44s$	55
6.6	Gráfico Comparativo entre os atrasos - TRANSYT x Modelo Proposto	56
6.7	Gráfico Comparativo entre os atrasos para os diferentes tipos de geração de veículos .	57

Lista de Tabelas

3.1	Classificação dos Modelos de Tráfego e Estratégias de Controle.	28
4.1	Matriz para Modelo de Fila no sistema SCOOT.	34
4.2	Modelo de Fila no sistema SCOOT com o <i>Vega Profile</i>	35
5.1	Proporção de fluxos nas vias.	42
5.2	Matriz de Ocupação gerado pelo algoritmo do Sistema de Detecção (em LPU).	43
5.3	Vetor de contagem de veículos (unidade).	43
5.4	Matriz de Valores para tomada de decisão do Controlador de <i>Split</i>	45
5.5	Matriz de Valores para tomada de decisão do Controlador de <i>Offset</i>	47
5.6	Vetor de Ciclo Mínimos para tomada de decisão do Controlador de Ciclo.	48
5.7	Matriz de Fila gerada para via principal.	49
6.1	Influência da defasagem no atraso	53
6.2	Atraso em $pcu - h/h$ (TRANSYT) e $pcu - s/s$ (Mod. Proposto).	55
6.3	Proporção de melhoria do modelo proposto \times TRANSYT.	56
6.4	Comparação entre os atrasos para Distribuições Pulsadas e Randômica	57

Capítulo 1

Introdução

A engenharia de tráfego, nos dias atuais, mesmo não estando presente de forma direta na vida da população, exerce grande influência no nosso cotidiano. O simples deslocamento de pessoas em seus veículos produz necessidades relacionadas ao tráfego. Se esta idéia for posta em conglomerados de pessoas, as pequenas ou grandes cidades, por exemplo, têm uma dependência direta com o seu sistema viário urbano, logo exige-se um controle de tráfego que atenda às mais variadas necessidades. É neste cenário que surgem os estudos relacionados ao controle de tráfego urbano.

Este trabalho implementa um modelo de simulação e controle de tráfego veicular urbano, baseado em uma das mais conhecidas estratégias na área de engenharia de tráfego, o SCOOT [24]. Por se tratar de um *software* com custos elevados de aquisição e manutenção, torna-se necessário no cenário de controle de tráfego urbano ferramentas computacionais de controle em tempo real. O SCOOT é um *software* com código fonte fechado, porém as estratégias de controle utilizadas pelo SCOOT, são estratégias consagradas e de vasta literatura técnica para a engenharia de tráfego, como o controle da distribuição de verde, de defasagem e de tempos de ciclo. Logo, a principal proposta deste trabalho é modelar um sistema que possua características de controle baseadas no modelo do sistema SCOOT. Posteriormente poderão surgir propostas de implementação deste algoritmo em *hardware*.

Tanto usuários, engenheiros ou administradores que gerenciam o tráfego urbano desejam o bom desempenho de uma malha viária. Quando se fala em desempenho no tráfego urbano, deve-se investigar os aspectos relacionados ao fluxo contínuo de veículos e os possíveis números de paradas e atrasos. A forma direta de controle desse tráfego urbano pode ser concentrado no controle de tempos semaforicos em cada intersecção das vias urbanas, pois, estes tempos influem diretamente no fluxo de veicular. Baseado nessa demanda existem várias estratégias utilizadas para o controle desses tempos, desde simples controles locais temporizados até redes inteiras de controle em malha viária que dependem de uma central inteligente que pode responder à demanda detectada em tempo real do fluxo de veículos de uma determinada área urbana.

Este controle tem como objetivo a solução dos conflitos garantindo segurança a todos os usuários das vias urbanas, incluindo pedestres e motoristas. Torna-se assim fundamental garantir um bom

ajuste dos semáforos para que a operação viária seja a mais eficiente possível, ao mesmo tempo em que se garante segurança para todos os usuários [8].

As estratégias de controle dos tempos semafóricos são basicamente: de tempos fixos ou de controle atuado. A estratégia de tempos fixos distribui os tempos semafóricos de acordo com um plano pré-determinado. Estes planos são elaborados a partir de contagens veiculares para levantamento estatístico das condições de fluxo, estas contagens permitem a elaboração de planos específicos para diferentes horários e dias da semana. [29]. Estes sistemas podem possuir planos dinâmicos, pois ao invés dos planos serem selecionados por uma tabela horária, os planos são selecionados por uma tabela de decisão baseada em parâmetros de tráfego. Assim, esses sistemas um pouco mais complexos continuam baseados em planos de tempos fixos [24].

Na estratégia de controle atuado, os tempos semafóricos se alteram em resposta à demanda verificada através de detectores veiculares. Os sistemas atuados são mais flexíveis. Neste caso, o objetivo é a obtenção de um algoritmo de controle ótimo em tempo real que apresente uma política para solucionar problemas de coordenação e interação semafórica entre intersecções e descarga de filas [8]. Este trabalho encontra-se inserido neste grupo.

1.1. Definição do Problema

O problema de otimização do controle do tráfego urbano é uma constante na maioria das cidades do mundo moderno, independentemente de padrões culturais e econômicos. Sua gestão demanda soluções adaptadas à cada realidade que são particulares e dinâmicas. Nos grandes centros urbanos, as condições do tráfego tendem à rápida saturação das vias e existência de longos períodos de congestionamento. Tal efeito ocorre tanto em países desenvolvidos, com expressiva frota de veículos, como naqueles com menor frota, pois nesses a rede viária também é menor [12] [14].

É neste cenário que pode-se problematizar a necessidade de controle de tempos semafóricos com desempenhos cada vez melhores, visto a grande demanda existente em tráfego veicular urbano. O bom desempenho pode ser avaliado pelo critério de atraso veicular, o número de paradas e o tamanho máximo de fila. Outra forma de analisar o bom desempenho é através da verificação de uma boa coordenação entre as intersecções da rede e a descarga de filas.

Na busca de oferta de tecnologia acessível, um fator que impede a propagação de estratégias de controle em tempo real é o elevado custo financeiro agregado, que vão desde a instalação física dos detectores, treinamento de pessoal, aquisição de licença de *software*, bem como o corpo técnico especializado para manutenção e operação dessas soluções. Este trabalho faz parte de um projeto para que possa ser desenvolvido um sistema de controle de tráfego baseado no modelo proposto para a região de Londrina no norte do Paraná, através da parceria com a CMTU - Companhia Municipal de Trânsito e Urbanização de Londrina e o IPPUL - Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina.

1.2. Objetivos

Pode-se nominar os objetivos deste trabalho como segue:

- Propor um algoritmo de controle de tráfego urbano atuado em tempo real.
- Elaborar uma revisão bibliográfica consistente para o estudo do controle de tráfego baseado na estratégia de otimização de *split* - distribuição de verde entre as vias em conflito, *defasagem* - diferenças de tempos entre os ciclos implementados e ciclo - adequação de tempo de ciclo que atenda as respectivas demandas de cada via.
- Formular os respectivos algoritmos do modelo de tráfego e de controle.
- Servir como ferramenta de auxílio para implementação do sistema de controle de tráfego proposto.
- Gerar resultados comparativos e de validação com outra estratégia de controle: o TRANSYT.

1.3. Organização dos Capítulos

São apresentados alguns conceitos de engenharia de tráfego no Capítulo 2. No Capítulo 3 são apresentadas algumas características e classificações dos princípios básicos das estratégias de controle de tráfego urbano existentes na literatura e no mercado. Os modelos utilizados no sistema SCOOT são aprofundados no Capítulo 4 em que são detalhados o modelo de fila, as estratégias de otimização de *split*, *offset* e ciclo. No Capítulo 5 é apresentado o modelo proposto de geração de veículos, de detecção veicular e dos controladores, bem como suas respectivas equações de estado que modelam o sistema implementado. No Capítulo 6 são apresentados os resultados de simulações e comparativos com outras estratégias de controle. As conclusões e perspectivas futuras são discutidas no Capítulo 7.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos básicos de engenharia de tráfego veicular urbano necessários para a compreensão do trabalho. São apresentados também alguns conceitos sobre as estratégias de otimização adotadas em controle de tráfego veicular urbano.

2.1. Conceitos em Engenharia de Tráfego

São apresentados alguns conceitos e nomenclaturas que fazem parte deste trabalho, os tópicos e definições básicas em engenharia de tráfego encontram-se também em [1], [6] e [28].

2.1.1 Redes Viárias

As redes viárias são compostas pelos seguintes elementos:

- **faixa de trânsito** - é o espaço determinado para o fluxo de veículos em um sentido único de fluxo [18];
- **pista** - é um conjunto de faixas de trânsito;
- **via** - é um conjunto de pistas que pode permitir sentido duplo de fluxo. Os conceitos de faixa, pista e via são ilustrados na Figura 2.1, para o caso de vias de pista dupla;
- **interseção** - é o local onde duas ou mais vias se cruzam, criando um conflito entre os sentidos de circulação de veículos;
- **semáforo** - é um dispositivo de controle de tráfego que alterna o direito de passagem de veículos e pedestres em interseções mediante a utilização de indicadores luminosos. Este sistema de controle organiza de forma cíclica e seqüencial a passagem de veículos e pedestres em uma interseção. Existem dois tipos de semáforos, os veiculares e os de pedestres. Eles diferem nas indicações luminosas e, portanto, nas mensagens que transmitem.

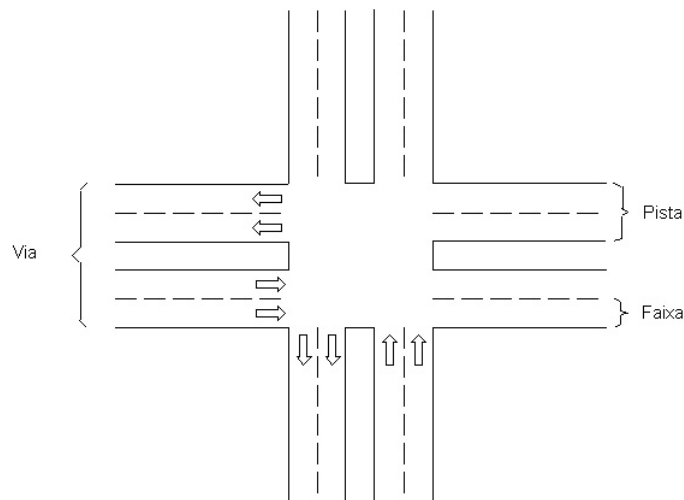


Figura 2.1: Representação de uma Interseção e 4 vias.

2.1.2 Fluxos Veiculares

O fluxo de veículos nas redes viárias pode ser caracterizado pelos conceitos definidos a seguir, que podem ser encontrados em [13], [28]:

- **velocidade de cruzeiro** - é considerada como a velocidade que os veículos atingem quando percorrem uma determinada distância sem que ocorram interrupções. Esta velocidade depende das condições geométricas das vias e das condições de tráfego. Neste trabalho é considerada constante e igual a 60Km/h (16,7 m/s);
- **fluxo (q)** - é o volume de tráfego expresso em veículos por hora. Volumes observados por períodos de tempo inferiores a uma hora são geralmente expressos por taxas de fluxo horário equivalente. O fluxo é dado por:

$$q = \frac{N}{T}$$

onde N é o número de veículos e T é a unidade de tempo;

- **densidade ou concentração** - é definido como o número de veículos que ocupam uma unidade de comprimento de uma via em um determinado instante de tempo. Quando a velocidade média (u) e a razão de fluxo (q) são conhecidas a densidade é usualmente calculada como:

$$k = \frac{q}{u}$$

- **LPU** - é uma unidade de detecção que dividida pelo tempo (segundos) representa a unidade do fluxo de veículos. A unidade *LPU* é utilizada neste trabalho, pois é a unidade de medida utilizada no sistema SCOOT e significa *link profile unit*.
- **pelotão** - um grupo de veículos que atravessa uma via, sem que ocorra dispersão;
- **fila** - é um grupo de veículos estacionário na linha de parada de uma via;

- **fluxo de saturação** - é a máxima taxa segundo a qual os veículos podem passar por uma dada aproximação se o sinal verde estivesse continuamente ocupado por uma fila grande o suficiente;
- **taxa de chegada** - é a taxa segundo a qual os veículos chegam em uma determinada faixa de uma pista. Esta taxa pode ser considerada conhecida e constante, ou ainda, medida através de detectores podendo ser modelada por uma função exponencial, pulsada ou aleatória;
- **taxa de descarga** - é a máxima taxa possível em que uma fila formada em uma faixa da pista é descarregada, esta taxa é igual ao fluxo de saturação enquanto existir fila a ser descarregada;
- **grau de saturação** - pode ser definido como a relação entre o número médio de veículos que chegam ao cruzamento durante o 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;
- **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.

2.1.3 Elementos de Engenharia e Controle de tráfego

Uma rede urbana é composta de vias e intersecções. Quando estas intersecções são semaforizadas, seus tempos semaforicos são ajustados por algum tipo de controle. O fluxo de veículos que circulam nas vias é afetado pelos ajustes realizados pelo controle. Estes ajustes podem ser realizados através de algumas variáveis de controle que serão definidas a seguir, ou ainda pela minimização direta de medidas de desempenho da rede de tráfego, discutidos na seção 2.6. As principais definições para o controle de tráfego [5], [26], [28] são:

- **tempo de vermelho** - é o tempo durante o qual a luz vermelha do semáforo permanece acesa indicando que os veículos não têm permissão para cruzar a interseção;
- **tempo de verde** - é o tempo durante o qual a luz verde do semáforo permanece acesa indicando permissão à passagem de veículos;
- **tempo de amarelo** - é o tempo durante o qual a luz amarela do semáforo permanece acesa indicando que os veículos devem parar antes de cruzar a interseção. Caso não seja possível parar, sem risco para a segurança do tráfego, devem continuar em frente e cruzar a interseção;
- **tempo perdido** - é a quantidade de tempo dentro de um ciclo que é destinada ao movimentos de uma fase, mas que não é efetivamente aproveitada, devido à aceleração para entrar em movimento quando inicia o tempo de verde e devido à diminuição da taxa de descarga no fim do tempo de amarelo;

- **tempo de verde efetivo (g)** - é o tempo de verde somado ao tempo de amarelo e subtraído do tempo perdido na fase considerada:

$$g = k + a - l \quad (2.1)$$

- **ciclo** - é a repetição de uma série básica de combinações semafóricas para uma interseção. Sua duração é chamada de tempo de ciclo. Um exemplo pode ser verificado na Figura 2.2;
- **fase** - cada conjunto de movimentos comandados por uma mesma configuração de indicações luminosas nos estágios do ciclo;
- **estágio** - parte de um ciclo durante o qual um grupo de movimentos têm permissão de passagem. Ainda na Figura 2.2 é mostrado um ciclo dividido em dois estágios para uma mesma interseção;
- **split ou distribuição** - é a forma como o ciclo está dividido entre os estágios; mais precisamente, é o conjunto de frações do ciclo atribuídas a cada estágio;
- **offset ou defasagem** - é o instante do início do estágio 1 da interseção, medido em relação a um relógio de referência comum a todas as interseções de um sistema. O *offset* se aplica na sincronização entre interseções que são operadas de forma coordenada como um sistema.

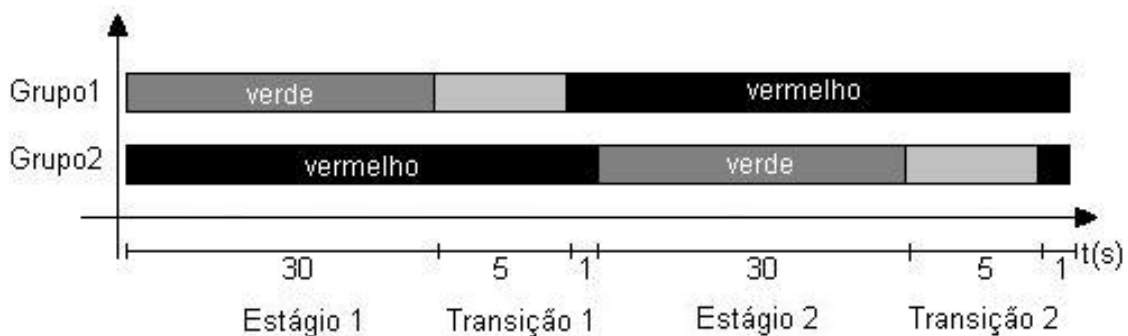


Figura 2.2: Exemplo de um ciclo com sua divisão entre estágios.

2.2. Tipos de Controle Semafórico

As estratégias de controle que podem ser utilizadas para o ajuste dos tempos semafóricos são classificadas em duas categorias: estratégias de Tempo Fixo e de Controle Atuado [28], [13]. Suas características e sub-divisões serão discutidas a seguir.

2.2.1 Tempo Fixo

As estratégias de controle que trabalham com planos de tempo fixo são baseados em dados históricos da média da demanda de fluxo para um período de tempo em que este plano seja operacional. A elaboração destes planos é realizada através de contagens de veículos. Diferentes planos

podem ser gerados para diferentes períodos do dia ou dias da semana para refletir o comportamento estatístico do fluxo de veículos. No entanto, os planos fixos não se adaptam às alterações de demanda que ocorrem em tempo real no dia-a-dia do tráfego. Isto significa que a qualidade do controle de tempo fixo decresce à medida que a variância do fluxo de veículos aumenta, pois quanto maior a variância, maior a dispersão dos dados de demanda histórica e a demanda verificada. Esta dispersão poderia ser corrigida pela atualização dos planos de tempos fixos, mas esta prática envolve custos elevados, deixando de ser realizada por períodos extensos, às vezes anos, implicando na deterioração da otimização dos tempos semafóricos.

Esta obsolescência dos planos semafóricos e a incapacidade de reação a fenômenos de curta duração tem motivado a implantação do controle atuado.

2.2.2 Controle Atuado

As estratégias de controle atuado utilizam-se de técnicas de detecção para monitorar o comportamento do tráfego. Baseados nas informações coletadas são realizados os procedimentos de otimização e implementação de variáveis de controle para o ajuste dos tempos semafóricos.

A categoria de controle atuado pode ser ainda subdividida, entre outras, em:

- **Seleção dinâmica de planos** - é uma melhoria nas estratégias de tempo fixo em direção às metodologias de controle atuado. É utilizada a monitoração do comportamento de tráfego para definir qual melhor plano de tempos fixos a ser aplicado para a demanda detectada. Este plano é selecionado a partir de uma biblioteca de planos pré-calculados;
- **Gap crítico** - é uma categoria de controle que permite a mudança de indicação semafórica para verde, em uma via, quando ocorre um espaçamento mínimo entre veículos sucessivos;
- **Adaptativo** - é a categoria mais avançada de sistemas atuados pelo tráfego, tendo por característica o cálculo *on-line* dos tempos semafóricos, sempre com base em uma estimativa do estado das vias (filas e fluxos) realizada a partir da medição dos fluxos correntes. Eles têm a vantagem de permitir o tratamento de fenômenos dinâmicos de curta duração, evitando que efeitos destes permaneçam por muito tempo nas vias. São em sua maioria descentralizados, determinando seus tempos semafóricos localmente. Os algoritmos propostos neste trabalho situam-se nesta categoria.

2.3. Otimização

A Otimização é a área da Matemática Aplicada que tem como objetivo o cálculo de valores ótimos para variáveis de decisão obedecendo a algum critério de desempenho, ao mesmo tempo que satisfaz restrições de um modelo matemático. A solução de um problema de otimização começa pela

transformação do problema em um modelo e, posteriormente a implementação de um algoritmo capaz de encontrar uma solução adequada para o modelo.

Um modelo é uma representação simplificada da realidade que preserva, em determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada. A modelagem de um problema não é uma tarefa trivial, dependendo de fatores subjetivos como intuição, experiência, criatividade e poder de síntese. A formulação de um modelo em linguagem matemática consiste em traduzir o modelo para uma linguagem formal, compreendendo variáveis, equações, desigualdades e fórmulas. Os processos de formulação e validação são iterativos, como mostra a Figura 2.3, pois envolvem múltiplas etapas de tentativa e erro, e interativos à medida que se faz necessária a intervenção contínua do modelador no processo de refinamento do modelo.

A linguagem utilizada para expressar os problemas de maneira declarativa é conhecida como Programação Matemática [34]. Os elementos de um modelo em Programação Matemática são:

- **Variáveis de decisão** - parâmetros cujos valores definem uma solução para o problema, por exemplo, quantidades produzidas, recursos utilizados ou tempo de verde;
- **Função objetivo** - uma função das variáveis de decisão, que deve ser maximizada ou minimizada, por exemplo, minimizar custos, reduzir número de homens/hora e maximizar lucros;
- **Restrições** - um conjunto de funções que define o espaço factível de soluções, por exemplo, limites para recursos, restrições operacionais de um processo de produção, limitações físicas e técnicas.

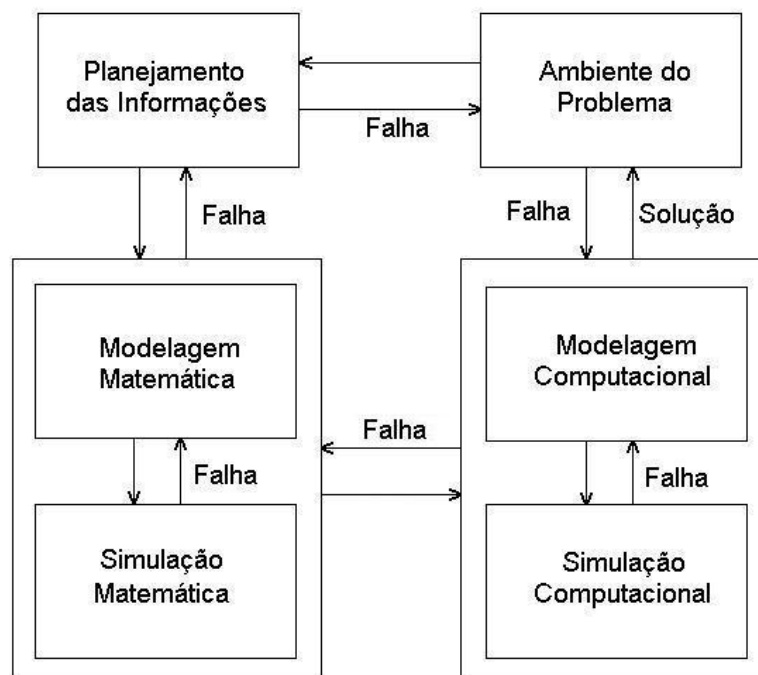


Figura 2.3: Diagrama de Blocos do Processo de formulação e validação de um modelo matemático.

2.4. Coordenação e interação entre interseções

Quando interseções semaforizadas são localizadas nas proximidades de outras, o controle de cada interseção isoladamente interfere no comportamento de chegada de veículos nas outras interseções. Os pelotões são criados pela descarga da fila de veículos formada durante a indicação semafórica vermelha. Os pelotões tendem a sofrer dispersão, a qual é função do espaço entre as interseções semaforizadas, do comportamento do motorista e das condições de tráfego ao longo da via. Quando a distância entre interseções não é grande suficiente para que ocorra dispersão, considera-se que o pelotão gerado na interseção a montante chega inalterado na interseção a jusante. Este comportamento motiva a tentativa de coordenar os semáforos de forma a privilegiar a passagem destes pelotões.[8]

O estado ideal de coordenação entre interseções ocorre quando é garantido que o primeiro veículo liberado durante o tempo de verde, atinge o final da fila na via a jusante quando o último veículo desta estiver partindo da linha de retenção. Idealmente, este procedimento deve repetir-se entre as interseções adjacentes.

A coordenação semafórica, conhecida por *onda verde*, é uma coordenação que ocorre entre os tempos semaforicos com o objetivo de privilegiar a passagem de um dado pelotão. A coordenação que ocorre entre os semáforos não implica, necessariamente, na coordenação dos fluxos de veículos, ou seja, pode ocorrer uma dispersão do pelotão entre as interseções e, conseqüentemente, os veículos não chegam a tempo de aproveitar o tempo de verde para cruzar a próxima interseção.

Nos algoritmos de Tempo Fixo e nos de Controle Atuado em que a variável *offset* é uma variável de controle, a coordenação semafórica pode ser obtida pelo ajuste desta variável entre interseções vizinhas. Nos algoritmos de Controle Atuado onde o *offset* não aparece explicitamente, e portanto, não é controlado, a coordenação é obtida de forma implícita, ou seja, quando ocorre a troca de informações sobre as chegadas de veículos entre interseções vizinhas durante o processo de otimização. Nos algoritmos de Controle Atuado, a coordenação também pode ser obtida de forma explícita, quando são criados níveis hierárquicos para o controle da coordenação. Um nível superior, que detém informações em nível de rede, define critérios para coordenação global.

2.5. Modelos de Formação de Filas

A evolução determinística das filas pode ser descrita por uma equação de estados onde em um determinado ponto de referência da via, a fila, em um determinado intervalo de tempo, é igual ao número de veículos em fila que existia no tempo anterior, mais o número de veículos que chegam, menos o número de veículos que partem do ponto de referência:

$$q(t) = q(t-1) + a(t, t-1) - s(t, t-1),$$

onde $q(t)$ é a quantidade de veículos em fila no tempo t , $a(t, t-1)$ é o número dos veículos que chegam no intervalo de tempo $(t, t-1)$ e $s(t, t-1)$ é o número dos veículos que partem no intervalo de tempo $(t, t-1)$.

A descarga de filas é realizada a uma taxa máxima de descarga igual ao fluxo de saturação da via. A descarga de fila Q_s pode ocorrer em duas situações [13]: (i) quando a duração do tempo de verde é suficiente para descarregar a fila formada durante o tempo de vermelho da via, este é o caso saturado, o fluxo veicular está no limite da capacidade da interseção, ou seja, o Q_s ocorre no final do tempo de verde; (ii) quando Q_s ocorre antes do término do tempo de verde, o sistema é chamado não-saturado, sobrando tempo para descarregar o pelotão que chega da via a montante. As duas situações descritas, com uma razão de chegadas constante, podem ser avaliadas na Figura 2.4. Uma terceira situação é quando não ocorre o Q_s , ou seja, a fila não é descarregada no tempo de verde, fica uma fila residual para o próximo tempo de vermelho. Este sistema é chamado de sobre-saturado e não será tratado neste trabalho.

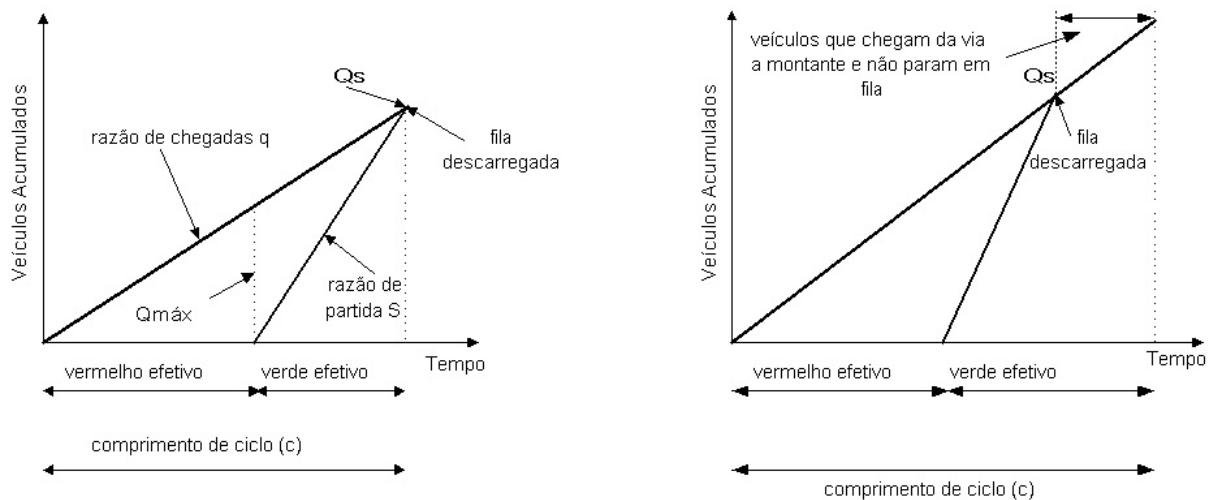


Figura 2.4: Formação e Descarga de Filas.

O fenômeno de formação e descarga de filas pode ser modelado de diferentes formas. Os modelos mais utilizados são o modelo de fila vertical e o modelo de fila horizontal.

O modelo de fila vertical assume que os veículos param em fila verticalmente, ou seja, que os veículos atravessam todo o comprimento da via até chegarem na linha de parada, onde formam a fila.

O modelo de fila horizontal considera características físicas da via em estudo. O comprimento da via é ocupado horizontalmente pelos veículos, considerando-se o tamanho médio do veículo conhecido. Neste modelo torna-se mais fácil verificar a ocupação da via e conseqüentemente os casos de saturação. Maiores detalhes e discussões dos modelos podem ser vistos em [8] e [17].

De acordo com a Figura 2.5, deve-se conhecer o comprimento da via e a velocidade média de percurso dos veículos, torna-se possível determinar o tempo que os veículos vão gastar para chegar na linha de parada da interseção em análise. É necessário definir um tamanho médio para os veículos. Então cria-se duas variáveis: $B(t)$ que define o final da fila, dado em metros e $F(t)$ que define o início da fila, também em metros. O valor inicial para $B(t)$ e $F(t)$ é zero. Quando o semáforo encontrar-se na indicação vermelha, $B(t)$ começa a ter valores crescentes pois os veículos começam a parar um atrás do outro. Depois $F(t)$ começa a crescer (para trás, em distância) quando o semáforo abre e a fila começa a descarregar. Seus valores são crescentes até encontrar o final da fila, e então, $B(t) = F(t)$,

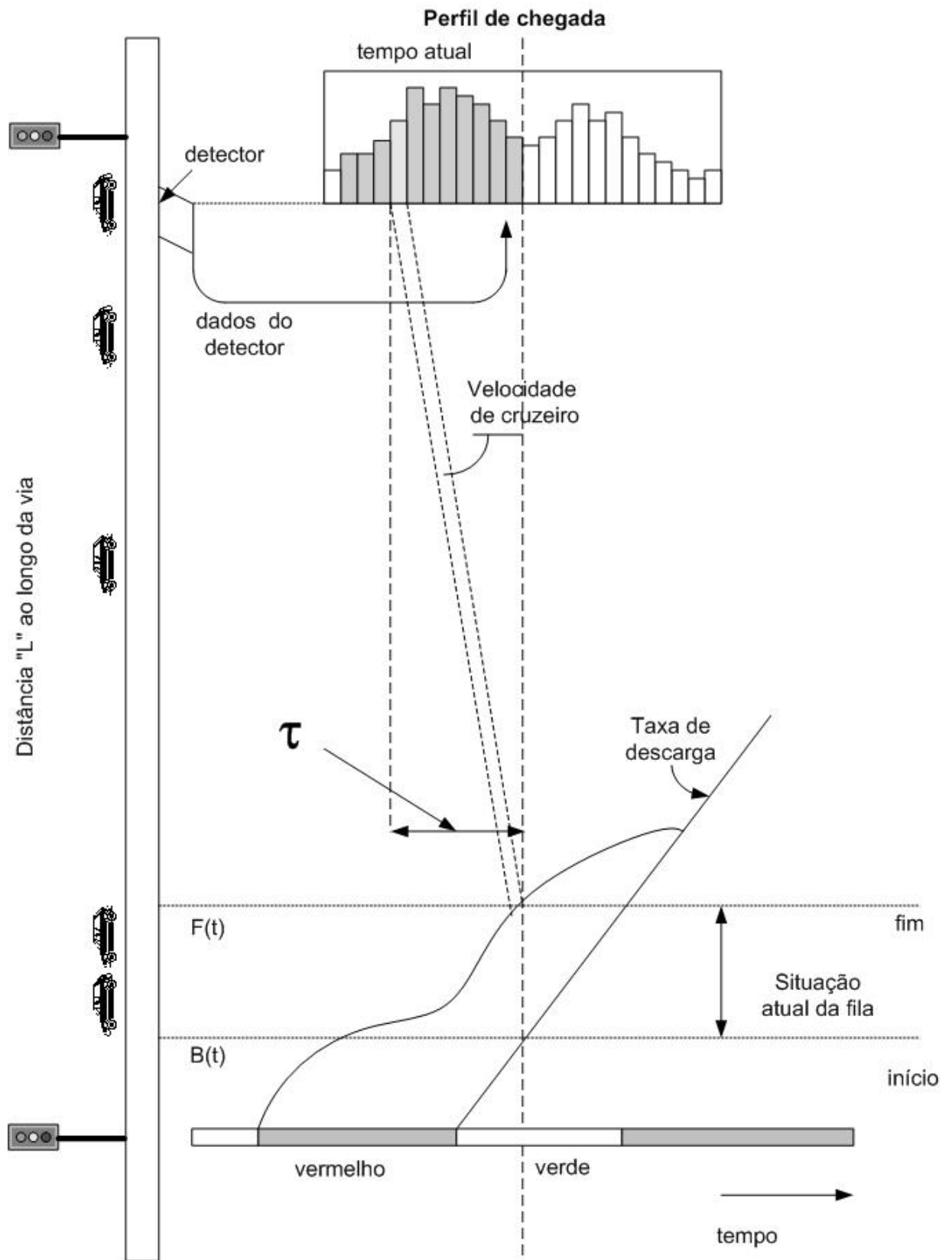


Figura 2.5: Fila horizontal (adaptada de [30])

quando as duas são levadas a zero. Isto significa que os veículos que continuarem chegando não terão mais que parar em fila. Assim pode-se modelar o comportamento de formação de filas, bem como a chegada de veículos em vários pontos da via.

2.6. Critério de Desempenho

O desempenho de um sistema viário pode ser medido através de uma combinação de critérios: atraso acumulado de veículos, número de paradas, consumo de combustível e poluição atmosférica. Os critérios de consumo de combustível e poluição atmosférica são aspectos que surgem como uma consequência dos atrasos e paradas de veículos, pois os picos de consumo e poluição ocorrem justamente nas interseções semaforizadas onde os veículos são obrigados a desacelerar, parar e depois acelerar novamente para entrar em movimento.

2.6.1 Atraso

O critério de atraso veicular acumulado está diretamente relacionado à formação de filas. Ele avalia o desempenho do tráfego através do número de veículos parados em fila. Assim quanto maior a fila, maior o atraso. A formação de filas, como discutido na seção 2.5 ocorre nas interseções em duas situações: (i) durante o vermelho, quando os veículos são obrigados a parar, (ii) quando a razão de chegadas é maior do que a capacidade de descarga da via durante o tempo de verde do semáforo. O último caso ocorre em situações de sobre-saturação [32].

A situação (i) pode ser observada na Figura 2.6, (adaptado de [32]). Considera-se uma razão de chegadas constante e fila inicial igual a zero no início da fase vermelha. Neste caso é considerado um fluxo de chegadas constante e uniforme q . Com a mudança de indicação semaforica para verde, e tendo-se ainda chegada de veículos, a fila continua crescendo a mesma razão q . A distribuição de partidas uniforme é realizada a uma razão de fluxo de saturação constante S , enquanto existir a fila. Se a fila formada durante o tempo de vermelho for totalmente descarregada antes de terminar o tempo de verde, (ponto Q_s) os veículos que continuarem chegando passam em velocidade de cruzeiro pela via sem precisar parar em fila. A partir de Q_s , a razão de partida dos veículos é igual a razão de fluxo de chegada. Na parte inferior da Figura 2.6 é representada uma composição do carregamento e descarga da fila, onde pode ser verificado o tamanho da fila crescendo e decrescendo. A área sob a curva determina o atraso ocorrido durante o ciclo avaliado.

A situação (ii) pode ser observada na Figura 2.7. A razão de chegadas maior do que a capacidade de descarga da via provoca o acúmulo de veículos em fila. A área sob o atraso uniforme torna-se crescente, caracterizando a sobre-saturação, ou seja, o bloqueio de filas que não podem ser descarregadas em um mesmo ciclo.

O processo de cálculo do atraso depende do conhecimento da variável número de veículos em fila. Para quantificá-la é necessário conhecer o fluxo de veículos nas vias. Este fluxo pode ser obtido

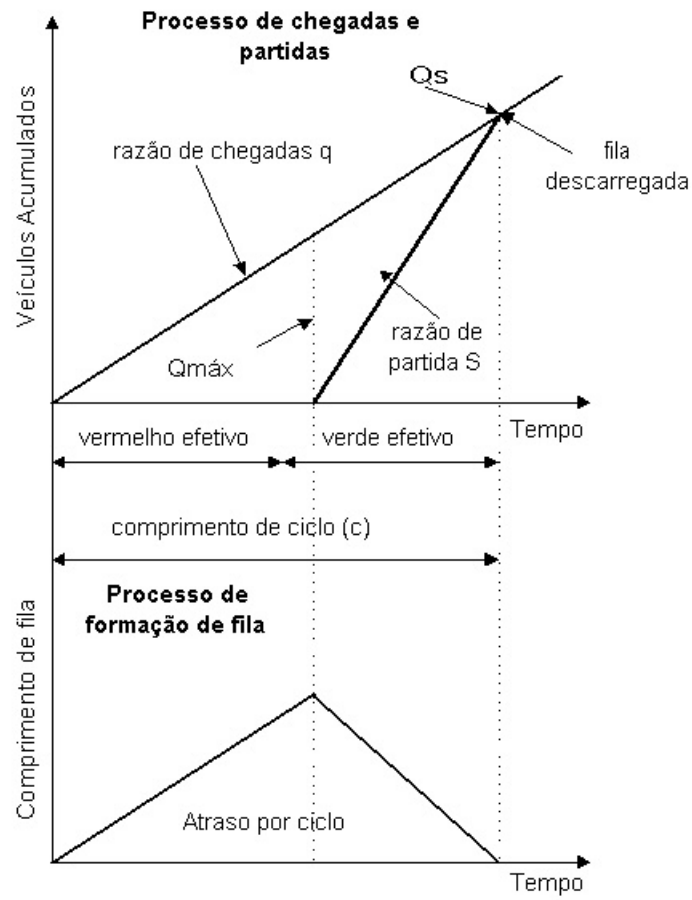


Figura 2.6: Componentes da formação do atraso (adaptado de [32].)

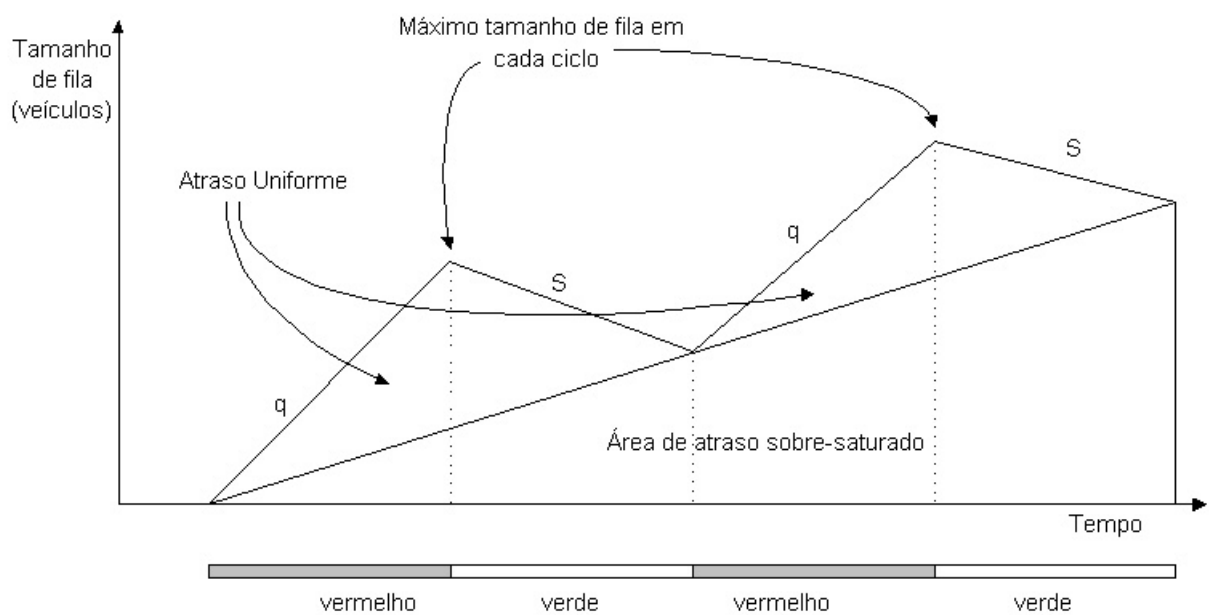


Figura 2.7: Componentes da formação do atraso sobre-saturado.

diretamente das contagens realizadas por sensores localizados nas vias ou manualmente por levantamento de dados históricos. Dependendo do arranjo dos sensores é possível obter o tamanho das filas ou apenas a quantidade de veículos em movimento ou ainda, a sinalização de algum veículo parado sobre um sensor. Além disso, pode-se desejar instalar um número menor de sensores do que o necessário para cobrir todas as faixas de rodagem, por questões de economia. Neste caso, a estimação das filas deverá ser feita com informação parcial dos fluxos veiculares. A previsão das filas, ou seja, sua quantificação, e o atraso médio acumulado no horizonte serão discutidos no Capítulo 4.

Nos algoritmos de tempo fixo e os de controle atuado com definição da variável *offset*, o critério de atraso está relacionado com esta variável, pois um ajuste sincronizado dos semáforos adjacentes pode proporcionar uma diminuição no tamanho da fila em uma via arterial.

2.6.2 Número de Paradas

O critério de desempenho número de paradas é obtido pela avaliação da quantidade de todo tráfego que sofre atraso, ou seja, quando tem-se veículos parados em fila, existe contribuição para o número de paradas. No entanto, diferentes situações onde ocorre uma parada de veículo devem ser consideradas:

- quando a fila está sob indicação semafórica vermelha - todos os veículos parados em fila contribuem para o número de paradas;
- quando os veículos encontram o final da fila e está já recebeu indicação semafórica verde - os veículos que por ventura, pararem ao encontrar o final da fila ainda parada e os veículos que não conseguirem cruzar a interseção dentro da indicação semafórica verde, contribuem para o número de paradas;
- quando a fila existente é descarregada, mas o veículo recebe indicação semafórica vermelha ao chegar próximo a linha de parada neste caso os veículos que não conseguem atravessar a interseção contribuem para o número de paradas.

O critério de paradas tem um peso menor em relação ao critério de atraso [8]. Assim, para simplificar a metodologia, o critério de número de paradas não foi aplicado neste trabalho.

2.7. Conclusões

Neste capítulo fez-se uma revisão de alguns conceitos básicos na descrição de um sistema de tráfego urbano. Discutiu-se também algumas ferramentas para modelar, controlar e otimizar as redes de tráfego urbano.

Baseado nesses conceitos de engenharia de tráfego urbano é que se constrói modelos de controle e otimização que visam interferir no sistema viário, objetivando melhorar as condições de tráfego e dos

critérios de desempenho, como atraso e número de paradas, neste contexto é que são apresentados no Capítulo 3 os tipos de controle e modelos existentes.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo serão apresentados alguns modelos de tráfego existentes na literatura e suas estratégias de controle, entre eles está o modelo de tráfego da estratégia SCOOT, que foi utilizado como base para o desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho.

Será apresentada também uma classificação dos modelos de tráfego e suas estratégias de controle através do agrupamento de suas características.

São discutidas e analisadas as características de controle de cada modelo de tráfego com suas respectivas características de desempenho.

3.1. Características e Estratégias de Controle de Modelos de Tráfego

A necessidade de solucionar os conflitos do tráfego urbano despertaram interesse de pesquisa desde meados da década de 50. Inicialmente os trabalhos concentraram-se na determinação do atraso em interseções isoladas, entre eles Webster [33]. O trabalho desenvolvido por vários pesquisadores foi o de 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. Tornando-se possível assim, estabelecer um comportamento dinâmico que pode ser utilizado como base para os algoritmos de simulação e controle de tráfego urbano.

O grau de saturação é uma variável que também depende dos tempos semafóricos, sendo definido como a relação entre o número médio de veículos que chegam ao cruzamento durante o 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 muito tempo, as filas crescem e diz-se que o sistema está saturado.

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

$$\lambda = \frac{g}{C} \quad (3.1)$$

onde C é o tempo de duração do ciclo e g é o verde efetivo. Da definição de *grau de saturação* e de (3.1), pode-se chegar a:

$$x = \frac{q.C}{s.g} = \frac{q.C}{\lambda C.s} = \frac{q}{\lambda s} \quad (3.2)$$

onde x é o grau de saturação, q é o fluxo observado e s o fluxo de saturação da faixa considerada.

A relação entre a demanda de fluxo, as variáveis de temporização e o grau de saturação estabelecidos por Webster é dada por:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5\lambda)} \quad (3.3)$$

onde:

- d é o valor atraso médio total por veículo (segundos/veículos);
- λ é a proporção do ciclo efetivamente aproveitada pelos veículos para se movimentarem através da interseção (verde efetivo) (g/C);
- C é a duração do ciclo (segundos);
- q é o fluxo observado (veículos/segundos);
- g é o tempo de verde efetivo (segundos);
- x é o grau de saturação.

Na equação (3.3) o primeiro termo representa a média do atraso dos veículos de chegada uniforme. O segundo termo estima o atraso adicional devido às chegadas randômicas de veículos. Este atraso adicional é atribuído à probabilidade da chegada de veículos causarem uma sobre-saturação temporária. O terceiro termo, finalmente, é um fator de ajuste que foi introduzido ao modelo para corrigir o atraso estimado, tendo sido obtido empiricamente, a partir de estudos de simulação.

A Figura 3.1, apresenta o resultado gráfico da equação (3.3), quando o atraso médio por veículo para uma faixa da 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. Isto se dá quando o grau de saturação tende a 1. No entanto, o resultado mais efetivamente aplicado com este desenvolvimento é o cálculo dos tempos semaforicos para estratégias de tempo fixo, através da minimização do atraso calculado pela fórmula proposta por Webster. Estes cálculos de temporização serão apresentados logo após a apresentação da fórmula do atraso. A temporização de um sistema semaforizado que opera com ciclo fixo determina basicamente dois fatores: o ciclo que fornece o mínimo atraso e a divisão deste ciclo entre diversas fases (*split*).

Após o trabalho de Webster, numerosos estudos foram desenvolvidos tendo como objetivo a estimação do atraso em interseções isoladas semaforizadas. Como resultado destes estudos, um número de modelos de atraso baseados na teoria de fila foram propostos para diferentes situações

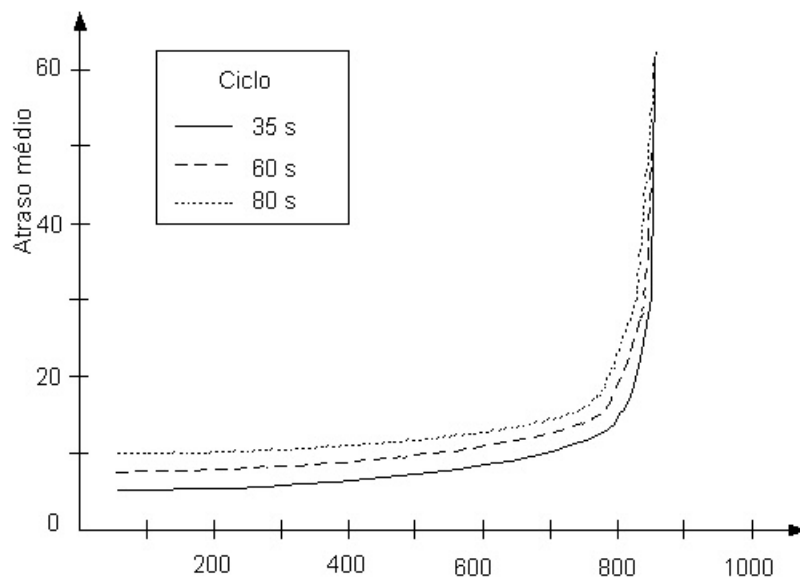


Figura 3.1: Atraso médio veicular de uma faixa

de tráfego. Dentre estes modelos pode-se citar o desenvolvido por Miller [3] e Akcelik [4] e os modelos desenvolvidos para uso no *Highway Capacity Manual* [5].

O passo seguinte na pesquisa de tráfego foi o desenvolvimento de modelos que controlassem interseções semaforizadas ao longo de uma via arterial, considerando assim o conjunto de semáforos como um sistema. Existem para isso as seguintes definições:

- *Banda verde* é o espaço entre um par de linhas paralelas que representam velocidades que delineiam um movimento progressivo no espaço e no tempo;
- *Velocidade de progresso* é a inclinação da curva banda verde que representa a velocidade dos veículos ao longo da banda verde;
- *Largura da banda* é a largura de uma banda verde em segundos. Indica o período de tempo disponível para o fluxo de tráfego em uma banda.

O controle de fluxo de tráfego em uma arterial, a partir dos conceitos apresentados, parte do princípio que, se um determinado número de usuários mantiverem seus veículos em uma dada velocidade constante, estes encontrarão uma seqüência de tempos de verde que minimizará o atraso e as paradas deste grupo de veículos. Isto porque os três conceitos enumerados anteriormente determinam uma velocidade, um tempo e o espaço de percurso deste veículos para garantir uma banda de passagem com minimização de atrasos.

Os modos de operação definidos, a velocidade de progressão e a largura de banda foram a base para o desenvolvimento de planos de tempos semaforicos fixos, com o objetivo de maximizar a *onda verde* nas arteriais [35]. Está dentro desta categoria o algoritmo MAXBAND [19], onde um arranjo dos tempos de verde é realizado com o objetivo de maximizar as bandas para passagem de pelotões

ao longo de uma via arterial. Note que o objetivo é, dados os tempos de verde, obter a máxima largura de banda, independentemente dos fluxos veiculares. Assim, pode ocorrer de um bom cálculo de *onda verde* entre semáforos resultar em progressão ruim devido a filas formadas durante o vermelho nas interseções a jusante. Já programas de coordenação como o TRANSYT calculam o *offset* considerando os fluxos previstos para a malha viária, (isto é, levam em conta as filas formadas no vermelho) de modo a minimizar, principalmente, o atraso médio veicular e o número de paradas.

Na década de 70, surgiram algoritmos de controle atuado, que permitem que os tempos semafóricos respondam as mudanças ocorridas nas condições de tráfego em tempo real. Inicialmente, surgiram algoritmos que utilizam os conceitos de *split*, *offset* e duração de ciclo, calculados ou incrementados a partir de informações recebidas de detectores veiculares, como o SCATS [22], e o SCOOT [16]. Durante as duas décadas seguintes surgiram os algoritmos que buscam a minimização de critérios de desempenho da rede através de algoritmos de otimização. Pode-se citar alguns deles como PROLYN [9], RHODES [25], ALLONS-D [27] e CRONOS [7].

Algumas estratégias de controle de tráfego citadas serão apresentadas nas seções seguintes.

3.1.1 TRANSYT

TRANSYT, *Traffic Network Study Tool*, será o primeiro modelo apresentado sendo o principal representante da categoria de tempos fixos [29]. O TRANSYT permite a coordenação dos tempos semafóricos entre as interseções através da otimização de *offsets* entre os grupos de semáforos adjacentes, levando em conta os fluxos que ocorrem na malha viária. Os planos de tempos fixos especificam as variáveis de controle: duração da fase, o tempo de ciclo e os *offsets* para cada interseção na rede. Estes são implementados em cada central localizada nos respectivos semáforos definindo para cada interseção quando deve ocorrer sua mudança de fase. Várias são as versões que existem hoje do TRANSYT, as principais linhas que surgiram foram a versão britânica, TRANSYT/10, versão utilizada para comparação e análise neste trabalho, e a versão americana TRANSYT/7F.

O princípio de funcionamento e a estrutura básica da estratégia de controle TRANSYT será discutida com o auxílio da Figura 3.2.

As variáveis de entrada do TRANSYT são as condições semafóricas iniciais, incluindo o estágio pré-especificado, a duração de verde mínimo para cada estágio e cada interseção, e os valores iniciais de *offset*, *split* e ciclo. Os dados de rede e fluxo compreendem: fluxos de saturação, tempos de viagem das vias, taxas de conversão (constantes e conhecidas) para cada interseção e as demandas também constantes e conhecidas. Condições de sobre-saturação, quando a capacidade da via é ultrapassada, não são descritas na versão utilizada. Em versões mais recentes, é possível definir o número máximo de veículos por *link* que, quando excedido, afeta o índice de desempenho. Algumas melhorias obtidas em outras versões são apresentadas em [2].

Um tempo de ciclo comum fixo é considerado para todas as interseções da rede com a finalidade de permitir a coordenação entre os semáforos. O coordenação é obtida através do ajuste entre os

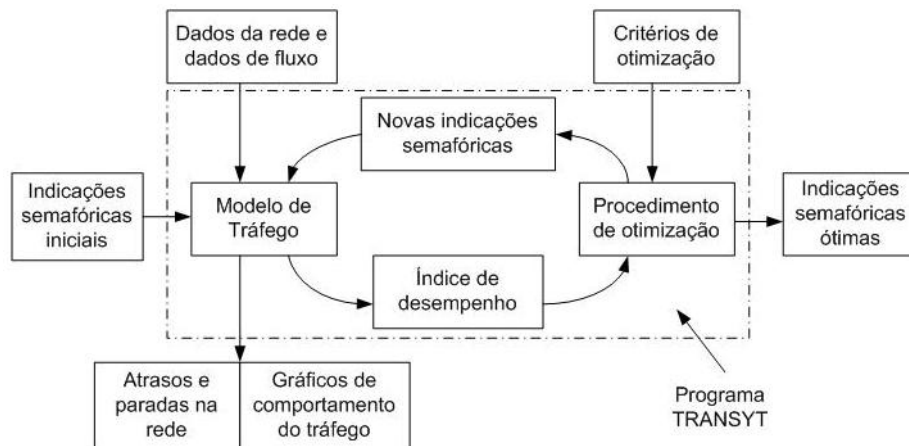


Figura 3.2: Modelo TRANSYT

offsets de forma a garantir que um pelotão compacto chegue à interseção a jusante durante seu período de indicação verde [31].

O método procede de forma iterativa. Para valores conhecidos de variáveis de decisão (*splits*, *offsets*, e tempo de ciclo), o modelo de rede dinâmico calcula o índice de desempenho correspondente. O algoritmo de otimização utiliza uma heurística *hill-climb* que introduz pequenas alterações nas variáveis de decisão, requisita novo cálculo das variáveis através do modelo e mantém este procedimento até encontrar um mínimo local.

As demandas de fluxo são obtidas através de contagens veiculares realizadas manualmente nos *links* de entrada. Estas contagens são descritas na forma de um histograma das chegadas de veículos que projeta o comportamento do fluxo na linha de parada, a cada ciclo. Este histograma é denominado Perfil de Fluxo Cíclico (PFC). Um exemplo deste perfil é apresentado na Figura 3.3.

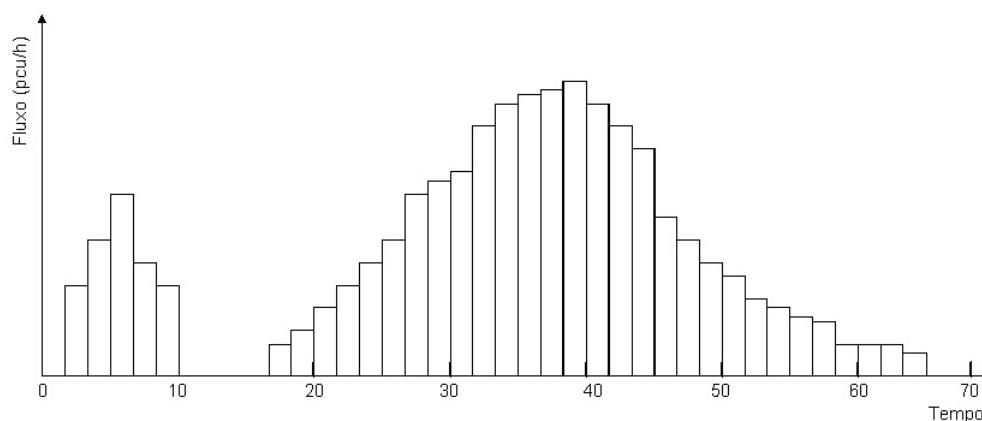


Figura 3.3: Exemplo de um Perfil de Fluxo Cíclico

Os dados numéricos são obtidos da manipulação das informações que os PFC fornecem. Assim, o número de veículos na linha de parada (m_i), durante um intervalo de tempo i é calculado pela relação:

$$m_i = \text{Max}(m_{i-1} + q_i - s_i, 0) \quad (3.4)$$

onde:

q_i - é o número de veículos que chegam na via durante um intervalo i . Este valor é dado pela soma do fluxo veicular parado durante o tempo de vermelho mais o fluxo veicular que parte durante o tempo de verde, chamado de *IN-profile* e representado pela área sob a linha escura, na Figura 3.4;

s_i - é o número máximo permitido de veículos que saem durante um intervalo i , valor dado pela soma do fluxo veicular que parte durante o tempo de verde, à razão de fluxo de saturação, mais o fluxo veicular que parte durante o tempo de verde à razão de chegada, chamado de *GO-profile* e representado pela área sob a linha escura, na Figura 3.5.

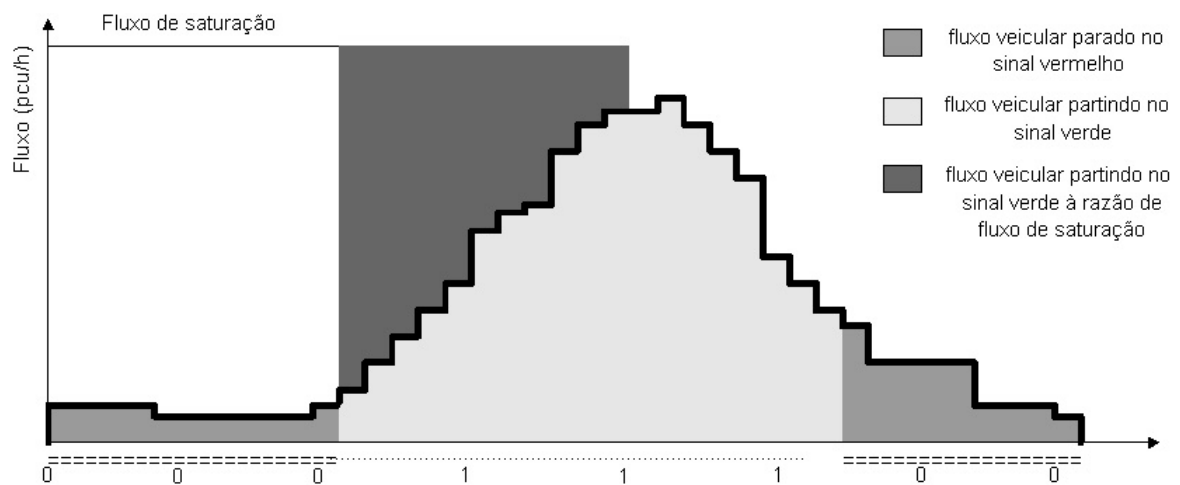


Figura 3.4: Exemplo de um PFC, *IN-profile*.

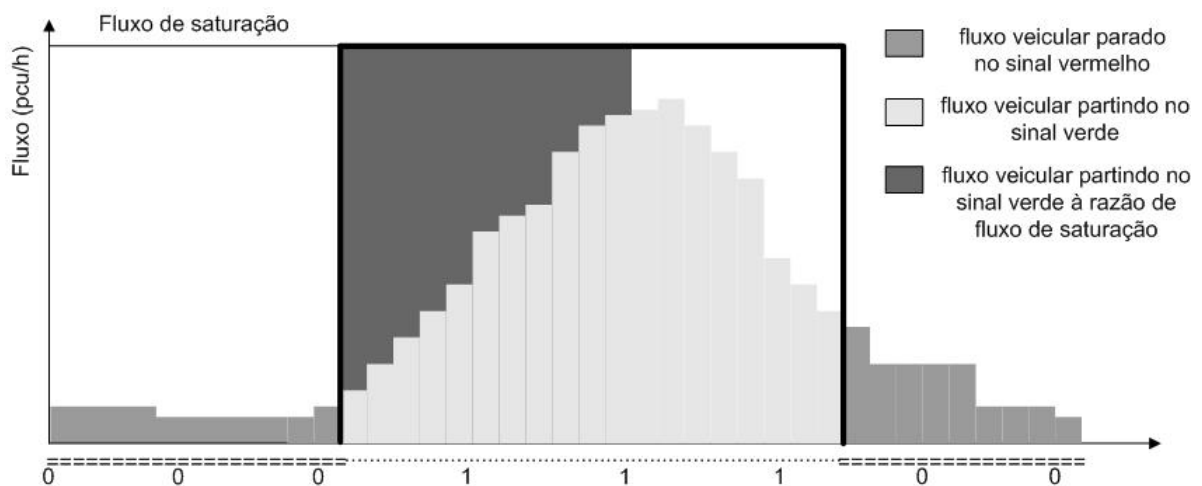


Figura 3.5: Exemplo de um PFC, *GO-profile*.

Na Figura 3.6 são representados, sob a curva escura, os fluxos de veículos que partem da linha de parada após terem sofrido atraso, este fluxo é denominado *OUT-profile*.

Outro aspecto do modelo de tráfego desenvolvido para o TRANSYT é a forma como é avaliado desempenho do sistema. É utilizada uma composição dos critérios atraso e número de paradas. O

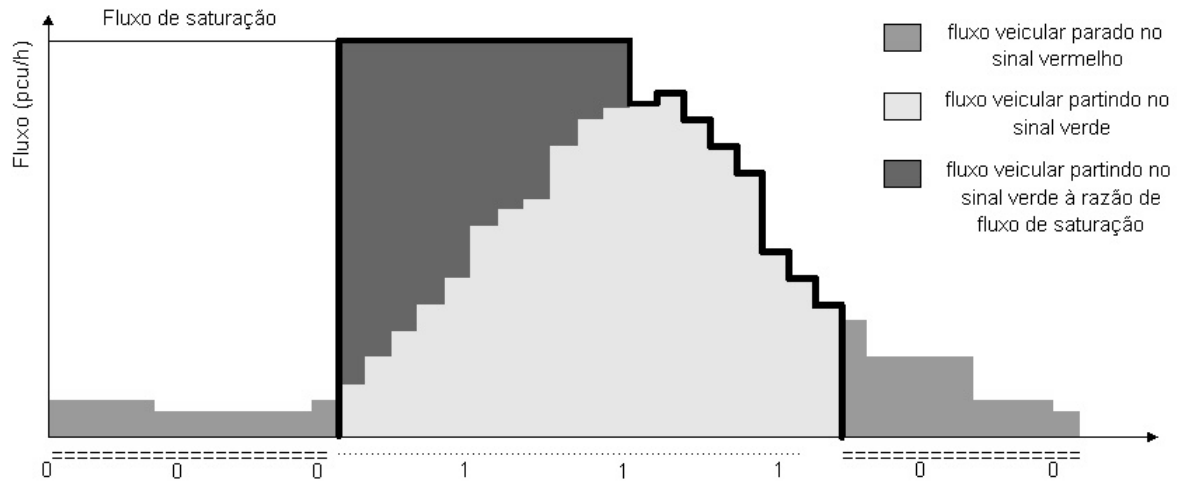


Figura 3.6: Exemplo de um PFC, *OUT-profile*.

atraso é calculado da seguinte forma:

$$\rho + \Delta = \frac{T}{4} \left\{ \left[(f - F)^2 + \frac{4f}{T} \right]^{\frac{1}{2}} + (f - F) \right\} pcu - horas/hora \quad (3.5)$$

onde:

- ρ é o atraso randômico;
- Δ é a razão de atraso quando o sistema está sobre-saturado;
- f é a razão de chegada média na via (pcu/h);
- F é o fluxo máximo que pode ser descarregado de uma via (pcu/h);
- T é a duração da condição de fluxo para cada temporização semafórica considerada (h).

A parcela uniforme do atraso é calculada de maneira similar ao primeiro termo da equação (3.3).

O critério de parada é a razão total de veículos que são forçados a parar em uma via calculado como a composição da parcela uniforme de paradas mais a parcela randômica de sobre-saturação.

Todo tráfego que sofre um atraso uniforme contribui para uma parcela do critério de parada uniforme mas o atraso no tráfego de alguns poucos segundos provoca apenas uma perda de velocidade e não paradas. Conseqüentemente, uma correção inclui uma fração de parada para pequenos atrasos, esta fração depende do tamanho do atraso.

É feita uma estimativa de paradas adicionais causadas por variações randômicas das chegadas de veículos a cada ciclo e também pela crescente saturação de filas nas vias onde as chegadas excedem a capacidade.

A estratégia TRANSYT permite a coordenação entre interseções para promover a progressão de pelotões identificados nos PFCs através do ajuste de *offsets* em seu plano de tempos fixos. A descarga de filas também é contemplada através do ajuste do *split*.

3.1.2 TRANSYT-AUT

O TRANSYT-AUT é uma modificação na estratégia anterior que busca atender a demanda do tráfego através da seleção dinâmica de planos. é utilizada a monitoração do comportamento de tráfego para definir qual melhor plano de tempos fixos a ser aplicado para a demanda detectada. Este plano é selecionado a partir de uma biblioteca de planos pré-calculados. Esta versão foi aplicada em Gothenburg, na Suécia [15].

Os princípios para obtenção de coordenação e descarga de filas são os mesmos aplicados na versão original do TRANSYT.

3.1.3 MAXBAND

A primeira versão da estratégia MAXBAND foi desenvolvido por Little, [19], ver também [20]. MAXBAND é um modelo de otimização de banda máxima que desenvolve planos de tempos semafóricos para vias arteriais. O algoritmo de otimização usado pelo MAXBAND é baseado em uma formulação de Programação Inteira Mista. Algumas características do MAXBAND são:

- a duração do ciclo é tratado como uma variável contínua sem especificação de limites;
- a velocidade dos veículos pode variar dentro de limites especificados;
- a melhor sequência de fases para cada interseção é automaticamente selecionada para um grupo específico;
- o tempo de limpeza de filas permite que o fluxo secundário acumulado durante o tempo de vermelho descarregue antes da chegada do pelotão;
- o modelo aceita comprimentos especificados pelo usuário para a banda verde em cada direção.

As entradas básicas do MAXBAND incluem a duração do ciclo, a geometria de diferentes vias, as razões de fluxo, as razões de fluxo de saturação, sequências de fases permitidas, tempos de limpeza de filas e velocidades. As saídas incluem um relatório de dados e um relatório de soluções que contém comprimentos de ciclo, comprimentos de bandas, sequências de fases selecionadas, *splits*, *offsets*, velocidade na via e tempo de viagem. Os cálculos para obtenção de tais soluções são realizados *off-line*.

O método é baseado em dados históricos e seus cálculos são realizados e tabulados previamente. Desta forma, a coordenação semafórica obtida através da otimização da banda máxima será tão boa

quanto os dados históricos forem próximos da realidade. Esta otimização não garante a minimização do atraso e o número de paradas, pois não leva em conta as possíveis filas formadas durante o vermelho.

3.1.4 SCATS

SCATS, *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*, é uma estratégia que busca a otimização da operação do tráfego verificada pelos critérios de atraso e paradas de veículos pelo controle dos parâmetros ciclo, *offset* e *split*. Mesmo não sendo utilizado um modelo matemático acoplado ao otimizador, a disponibilidade de dados que descrevem o comportamento do tráfego através dos detectores são fundamentais e suficientes para a operação do algoritmo [22].

O sistema é composto de computadores locais (regionais) e uma central. Cada computador regional mantém o controle de tráfego autônomo. O computador central é responsável pelo monitoramento do desempenho do sistema e do estado dos equipamentos. Os controladores locais são agrupados em sistemas (grupos de semáforos que não interagem com outros grupos) e subsistemas (semáforos que interagem entre si formando sistemas). Esta estrutura pode ser vista na Figura 3.7. Os subsistemas são considerados como elementos básicos de controle. Eles são compostos de uma a dez interseções que compreendem uma entidade de tráfego discreta. A estratégia de controle é selecionada pelo algoritmo, em resposta às variações detectadas de demanda e capacidade e tem como resposta os tempos de verde, *splits*, *offsets* e comprimentos de ciclos apropriados para cada subsistema e *offsets* que são aplicados entre subsistemas.

Uma biblioteca contendo quatro planos de *split* é mantida para cada interseção e a seleção do melhor plano a ser aplicado é feita em nível de subsistema, baseado nas necessidades da interseção crítica do subsistema. Normalmente é definida apenas uma interseção crítica para cada subsistema.

São mantidos também cinco planos internos de *offsets*, que determinam os *offsets* entre as interseções dos subsistemas, e cinco planos externos de *offsets* para as interseções que fazem vizinhança entre os subsistemas. Todas as interseções de um subsistema operam em uma duração de ciclo comum.

Todas as interseções e seus acessos são equipados com detectores de veículos de laço indutivo. Eles são localizados imediatamente à frente da linha de parada e têm dupla função ao proporcionar os dados de fluxo de tráfego, (i) para estratégia de controle e (ii) atuação local ou tática dos veículos. Como estratégia de operação, os controladores locais passam para o computador regional, de cada detector definido como detector estratégico, o número de veículos contados durante o verde em cada aproximação e o tempo total em que o laço ficou desocupado durante o verde. Esta informação é utilizada para selecionar, em um ciclo, o plano de fases do *split*, o plano interno e o externo de *offset* e a duração do ciclo a ser aplicado ao subsistema para o ciclo seguinte junto com uma modificação incremental de *splits* e *offsets*.

Uma medida de tráfego básica utilizada pelo SCATS é análoga ao grau de saturação em cada aproximação da interseção. Ela é definida como a razão entre o tempo de verde efetivamente utilizado

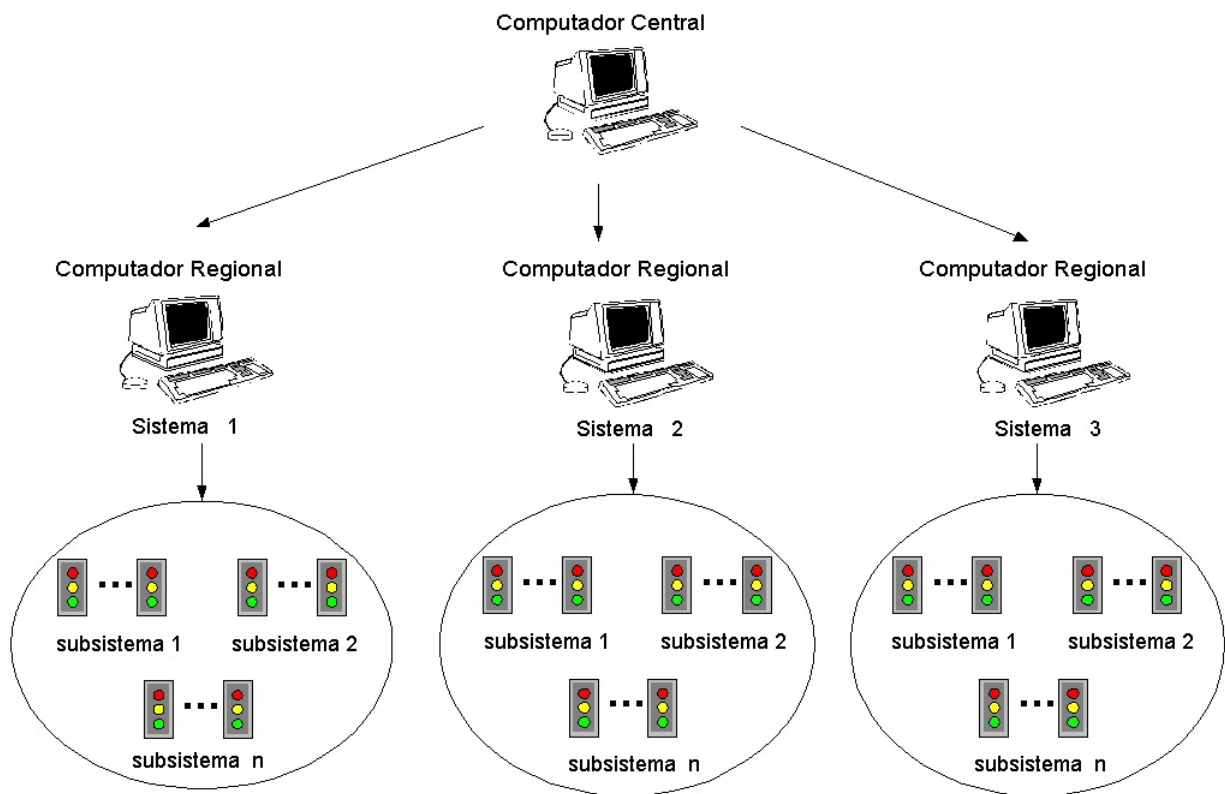


Figura 3.7: Sistema utilizado pelo SCATS.

e o tempo total de verde disponível em cada aproximação. A duração de ciclo é ajustado para manter o grau de saturação em torno 0.9 na pista com o maior grau de saturação. Esta duração do ciclo é calculada para uma interseção crítica definida pelo usuário [11].

No SCATS existem quatro planos de coordenação que são tipicamente aplicados:

- baixo congestionamento;
- fluxo de tráfego balanceado;
- fluxo de tráfego desbalanceado em uma direção;
- fluxo de tráfego desbalanceado na direção oposta.

SCATS seleciona um plano de coordenação baseado nas medidas de fluxo. Para cada plano de coordenação existem dois *offsets*. Um é usualmente baseado no tempo de viagem e é usado para pequenos ciclos (e baixo congestionamento), o outro é usualmente mais curto usado para ciclos maiores (quando existe congestionamento) [11]. No entanto, estes planos de coordenação sofrem ajuste em função do grau de saturação verificado.

3.1.5 PRODYN

O PRODYN é uma estratégia de controle em tempo real, baseado em um algoritmo de Programação Dinâmica [36], associado à estratégia de horizonte deslizante para otimização dos tempos semafóricos.

Os semáforos são controlados a cada período de amostragem k , de 5 segundos. Durante um dado período de amostragem, o controle a ser aplicado no período de amostragem seguinte é calculado com base nas medidas de fluxo relativas ao período de amostragem prévia.

O algoritmo constrói uma árvore de decisão com base em um modelo simplificado do tráfego baseado em equações de estado. O critério de desempenho a ser minimizado pela otimização é a soma dos atrasos sobre o horizonte mais um custo terminal que estima o atraso associado a um dado estado no final do horizonte.

A coordenação entre interseções é realizada de forma implícita pelo PROLYN [10]. Em nível de rede, a estrutura de controle é descentralizada. Quando o controlador de uma interseção termina sua otimização sobre o horizonte, ele simula todas as saídas da interseção relativas ao controle ótimo para todo horizonte. Tais saídas são computadas para as vias de saída e as proporções de conversão entre vias são determinadas *off-line*. Uma mensagem com 15 valores de saídas, é enviado para cada interseção controlada a jusante. Esta mensagem é utilizada pelo controlador a jusante para, no período de amostragem seguinte, calcular uma melhor previsão de chegadas do que a média dos valores utilizada quando a interseção a montante é muito distante (distância maior de 200 m). Este procedimento é ilustrado pela Figura 3.8.

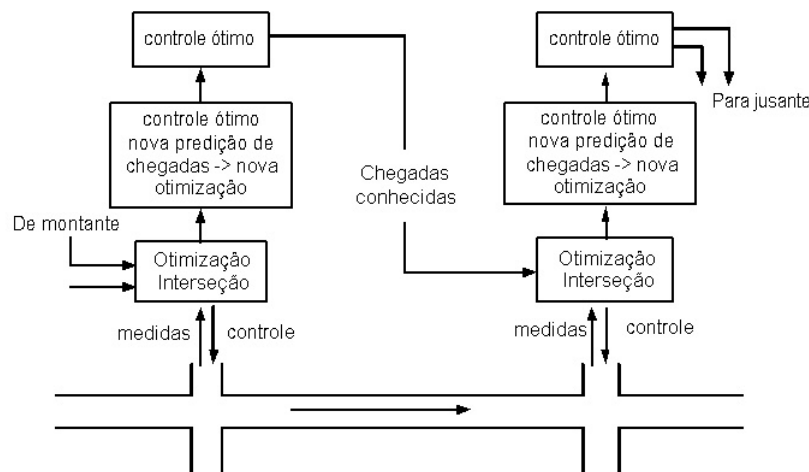


Figura 3.8: PROLYN - Coordenação implícita

3.2. Classificação e Comparativo entre as Estratégias de Controle

Na seção seguinte será discutida características comuns às estratégias citadas, com o objetivo de classificá-las tentando assim facilitar sua compreensão.

3.2.1 Critério de Desempenho

O melhor ajuste dos tempos semafóricos é obtido após avaliação de um critério de desempenho. Estes critérios já foram discutidos na seção 2.6.

Na tabela 3.1 será apresentado um resumo das características discutidas.

Tabela 3.1: Classificação dos Modelos de Tráfego e Estratégias de Controle.

Características	Transyt	Scoot	Scats	Prodyn
Arquitetura	D	D	D	D
Otimização	H-C	H-C	He	PD
Modelo de Fila	V	V	V	V
Desempenho	A-P	A-P	A-P	A

legenda: D - Descentralizado, H-C - Hill-Climbing, PD - Programação Dinâmica, He - Heurística, V - Vertical, A-P - Atraso e Parada, A - Atraso.

3.3. Conclusões

Foi apresentado um panorama das estratégias de controle de tráfego mais conhecidas e relevantes para o problema de desempenho de sistemas viários. Foi apresentado também como cada estratégia trata os problemas de coordenação e descarga de filas.

As estratégias apresentadas foram testadas e algumas aplicadas em seus países de origem. Uma grande limitação na utilização destas estratégias, como pacotes comerciais a serem adquiridos e aplicados em sistemas de tráfego urbano brasileiro é que cada uma delas têm especificidades relativas aos sistemas de tráfego de seus países de origem. Além disso, o custo destas estratégias é elevado na aquisição, implantação e manutenção. Desta forma o algoritmo proposto neste trabalho e apresentado no próximo capítulo tem características similares às estratégias apresentadas quanto a arquitetura, estratégia de otimização, modelo de fila e detecção, e ainda critério de desempenho. As simplificações e diferenças se devem às características dos nossos sistemas de tráfego e da busca de um algoritmo para implementação em baixo custo.

Baseado nesse em algumas características desses modelos apresentados, existe uma das estratégias mais difundidas de controle em tempo real, o SCOOT. Todos os conceitos e modelos do SCOOT serão apresentados no Capítulo 4 de forma completa e detalhada, pois é este modelo que servirá de base para os estudos desta pesquisa.

Capítulo 4

Estudo do Modelo de Tráfego Baseado na Estratégia SCOOT

No Capítulo 3 foram apresentados outros modelos de tráfego encontrados na literatura. Neste capítulo é apresentado de forma detalhada o modelo que foi base de desenvolvimento deste trabalho, a estratégia SCOOT.

O funcionamento do SCOOT é fundamentado em um modelo de tráfego que tem por fim minimizar atrasos e paradas sob determinada programação semafórica, simulando os efeitos das alterações dessa programação sobre o tráfego dentro da área controlada. Os otimizadores de ciclo, *split* e defasagens do SCOOT atuam testando pequenas alterações na programação semafórica vigente, implementando aquelas que resultarem em benefícios detectados no modelo de tráfego embutido [21].

Ainda neste capítulo, é apresentado o *Cyclic Flow Profile* (CFP) ou Perfil Cíclico de Fluxo, semelhante ao utilizado no TRANSYT, descreve também o comportamento de uma via urbana. Este perfil de comportamento provém do modelo de fila juntamente com o sistema de detecção, desta forma é gerado a curva de carga e descarga de veículos em determinado intervalo de tempo.

Cada otimizador é detalhado de forma objetiva, buscando-se o bom entendimento dos princípios de funcionamento que garantem um melhor modelamento matemático.

4.1. Modelo de Tráfego SCOOT

O SCOOT, *Split Cycle Offset Optimization Technique*, é um sistema de controle de tráfego em tempo real, na medida em que varia os tempos semafóricos (distribuição de verde, defasagem e ciclo) em função do fluxo de tráfego a cada momento. Ao contrário do controle de tráfego em tempos fixos para o qual os tempos semafóricos são invariáveis, o sistema de controle em tempo real reage às variações de tráfego, de forma a adequar os tempos semafóricos ao tráfego em cada instante [24].

O modelo de tráfego requer uma estimativa da demanda, isto é do padrão de chegadas de veículos na aproximação. O SCOOT obtém esse padrão a partir de laços indutivos colocados preferencialmente à cerca de 20 metros da interseção a montante. Dessa distância deve resultar um tempo de percurso mínimo, sob condições de fluxo livre, do detector à linha de retenção, de cerca de 8 a 12 segundos. Essas condições têm duplo objetivo: prover tempo suficiente para o modelo prever as chegadas na faixa de retenção e permitir que se detectem condições de congestionamento tais que afetem a descarga de fluxo da interseção a montante. De um modo geral, é necessário um laço para cada duas faixas de tráfego [21].

No modelo SCOOT os veículos são identificados por laços detectores, que são fios de cobre bobinados em fendas feitas no asfalto, na forma de retângulos. As informações coletadas pelos detectores são enviadas para o controlador, que monta o CFP da via e busca, pelos seus algoritmos de controle, a melhor resposta de tempos semafóricos para atender a demanda medida. Neste caso, o modelo de fila utilizado é o vertical.

4.2. Estrutura Básica do SCOOT

O sistema SCOOT é constituído, basicamente, por 5 partes:

- Sistema de Detecção de Veículos;
- Sistema de Transmissão de Dados;
- Computador Central;
- Controladores;
- Grupos Focais-Semáforos.

O sistema de detecção detecta o fluxo de veículos, os dados são recolhidos pelo controlador que os envia, através do sistema de transmissão de dados, ao computador central. O computador central processa as informações e os envia ao controlador que os implementa nos grupos focais [24].

4.3. Sistema de Detecção

O sistema SCOOT utiliza laços indutivos instalados no pavimento para a detecção do fluxo de veículos. O sistema de detecção verifica a cada 1/4 de segundo se o laço encontra-se ocupado ou não. Desta forma este sistema cria um vetor binário de ocupação ou não de veículo, conforme mostra a Figura 4.2.

O que se detecta não é exatamente o fluxo ou o volume de veículos nem é a percentagem de ocupação do laço. A esta medida detectada atribui-se valores que possuem um peso determinado,

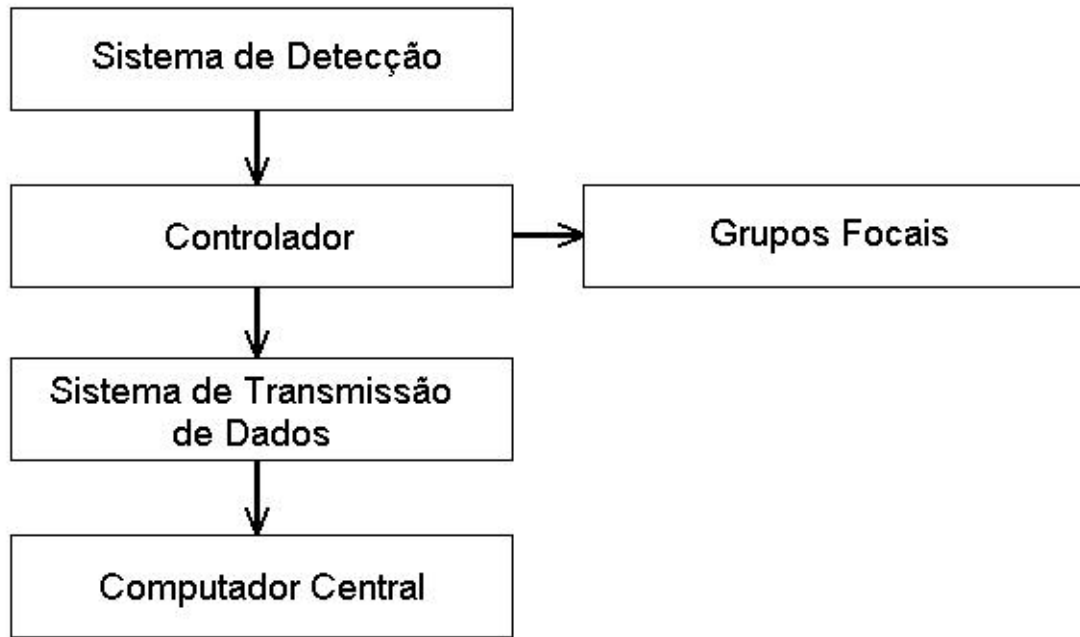


Figura 4.1: Estrutura do SCOOT (adaptada de [24])



Figura 4.2: Vetor do Sistema de Detecção SCOOT

para se ter como resultado uma mistura de fluxo e volume de tráfego, em que a unidade é expressa em *LPU* - (*Link Profile Unit*). O número de *LPU*'s é obtido de forma que o primeiro intervalo ocupado, ou seja, o intervalo de 1/4 de segundo após um intervalo não ocupado equivale a 7 *LPU*'s, nesta seqüência, se ocorrerem intervalos ocupados sucessivamente, o valor de *LPU* correspondente decresce em 1 unidade e do sétimo intervalo em diante, cada intervalo equivalerá a 1 *LPU*, até ocorrer novamente um intervalo de quarto de segundo não ocupado, conforme pode ser visto na Figura 4.3.

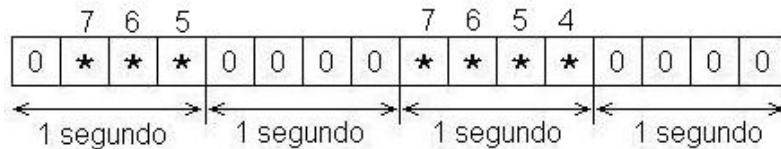


Figura 4.3: Atribuição de valores em *LPU*

A medida em *LPU*'s é função do fluxo de veículos, da velocidade, do comprimento dos veículos e da disposição física do laço na via. Assim, não existe uma equivalência fixa ou matemática entre o número de veículos e o número de *LPU*'s, uma vez que a equivalência entre as duas medidas varia de acordo com o local e o instante, pois depende do comportamento do tráfego em cada local e em cada instante.

O modelo de detecção do SCOOT não é apropriado para efetuar contagem de veículos. Porém, é possível obter uma contagem aproximada utilizando-se os detectores desde que se aplique um fator de correção [24]. Todos os parâmetros de tráfego utilizados no sistema SCOOT são expressos em *LPU*, como o fluxo de saturação que é dado em *LPU/s* e o tamanho da fila que é expresso em *LPU*. Situações de congestionamento podem ser identificados diretamente através dos detectores SCOOT, para isso a instalação física do sistema de detecção deve estar posicionado de tal forma que não se encontre ocupado quando o fim da fila normal do semafóro não esteja sobre o laço. Dessa forma, se o laço estiver ocupado permanentemente por um determinado período, isto significa que a via de aproximação está congestionada.

O intervalo é definido como congestionado se o vetor de detecção estiver ocupado por 4 segundos consecutivos, ou seja, 16 intervalos de 1/4 de segundo. Define-se o índice de congestionamento (B_l) como sendo:

$$B_l(t) = \frac{4.N_l}{C_i} \quad (4.1)$$

onde $B_l(t)$ é o índice de congestionamento da via l até o instante t , N_l é o número de intervalos congestionados durante o ciclo da via l em estudo e C_i é o tempo de ciclo vigente na interseção i ;

Um intervalo congestionado é representado pela Figura 4.4.

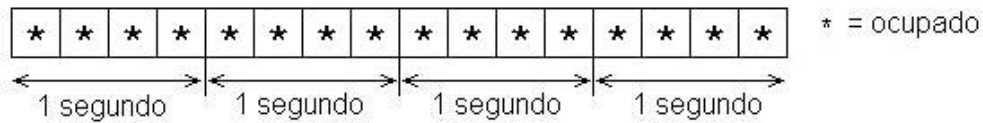


Figura 4.4: Um intervalo congestionado

4.4. Perfil Cíclico de Fluxo - CFP

O Perfil Cíclico de Fluxo ou *Cyclic Flow Profile* - CFP é um histograma de chegada na linha de retenção semaforizada. Esses perfis de fluxo são construídos para cada via. Baseados no CFP de cada via é possível ao sistema SCOOT calcular atrasos e o número de paradas para diversos conjuntos de valores de tempos semafóricos, escolhendo aquele que minimize o atraso e o número de paradas. Esses tempos semafóricos, assim obtidos, são implementados imediatamente, a tempo de favorecer os veículos que foram detectados e que compuseram o Perfil Cíclico de Fluxo. Por esse motivo o SCOOT é dito um sistema responsivo, pois os tempos semafóricos são calculados para escoar veículos que estão sendo detectados no momento que chegam no ciclo seguinte.

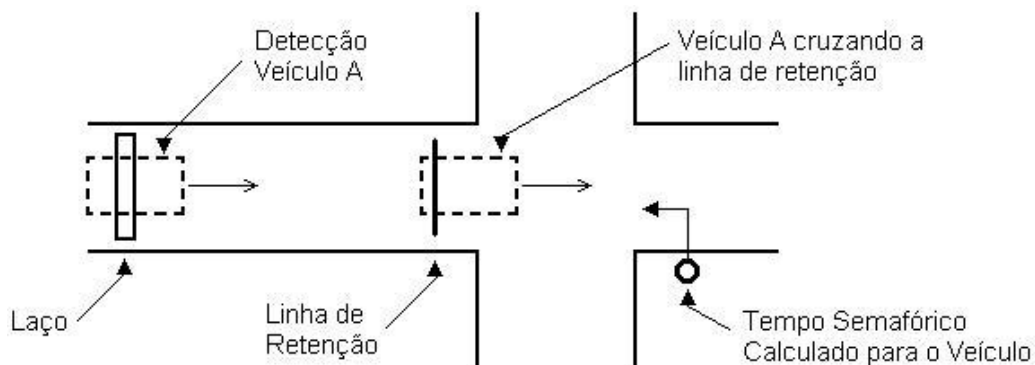


Figura 4.5: Detecção para o CFP

É com base nos CFP's que são feitos os processos de otimização. O sistema SCOOT constrói 2 tipos de Perfis de Fluxo Cíclico: o perfil curto denominado *short term cyclic profile* e o perfil longo denominado *long term cyclic profile*. O perfil curto é implementado para cada ciclo individualmente, analogamente é construído o perfil longo que tem como base *ciclos corridos* que são concatenações de perfis curtos e é formado eliminando-se o intervalo mais antigo e agregando um novo intervalo à direita e assim sucessivamente. O perfil longo permite que seja feita uma análise do comportamento da via semaforizada de acordo com o fluxo de veicular detectado durante um tempo de amostragem considerável.

O otimizador de *split* utiliza o perfil curto de fluxo, enquanto que otimizadores de *offset* e de ciclo utilizam o perfil longo de fluxo.

4.4.1 Modelo de Fila

O modelo de fila adotado no SCOOT é o modelo vertical, pois não é considerado o tamanho da via nem o tempo gasto pelo veículo nesse deslocamento. São considerados para o modelamento da fila as ocupações medidas e a fila acumulada ao longo do tempo.

Através do sistema de detecção e do controlador é implementado uma matriz que representa o comportamento e modelo da fila, como é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Matriz para Modelo de Fila no sistema SCOOT.

Intervalo	Ocupação	Fila	R/G
1	16	22	RRRR
2	18	40	RRRR
3	2	42	RRRR
4	16	58	RRRR
5	2	60	RRRR
6	16	66	RRRG
7	2	28	GGGG
8	18	6	GGGG
9	18	0	GGGG
10	2	0	GGGR

A matriz representa o modelo de formação de fila, a primeira coluna representa os intervalos que são amostragens de um período de 4 segundos, a coluna seguinte mede a ocupação medida pelo detectores em LPU. A terceira coluna modela a fila acumulada em LPU, observe que enquanto o semáforo está em vermelho (R-Red) tem-se um acúmulo de fila detectada mais fila acumulada. Ao iniciar o tempo de verde (G-Green) a fila é descarregada na razão do fluxo de saturação. Para este modelo considerou-se um fluxo de saturação de 10LPU/s.

Observe que na Tabela 4.1 no intervalo 6 quando o semáforo indica verde, inicia-se a descarga da fila, que posteriormente na seção seguinte será a referência para o início da descarga de veículos, na indicação gráfica.

4.4.2 Carga e Descarga de Veículos

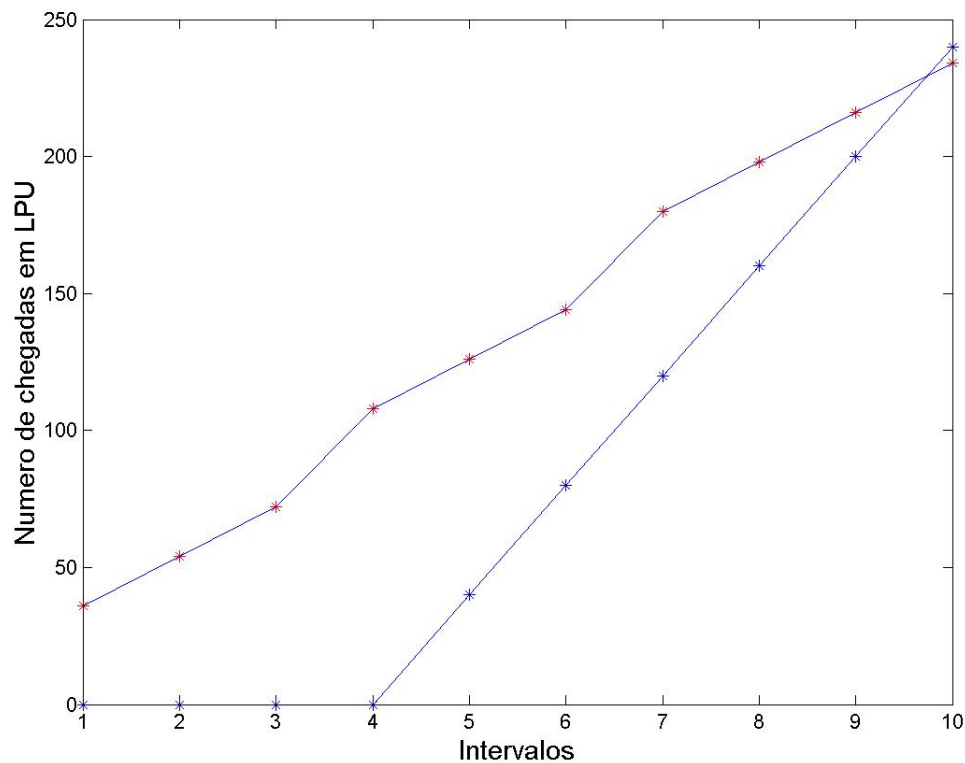
Com base no modelo de fila proposto pode-se acrescentar à Tabela 4.1 o perfil total de chegadas de veículos detectados, para servir de base na construção do que se denomina no modelo SCOOT de *Vega Profile*.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.2, pode-se construir o *Vega Profile* do sistema SCOOT, este modelo serve de base para análises nos algoritmos de otimização desta estratégia. Como já citado anteriormente sabe-se que fluxo de saturação da via é de 10LPU/s, pode-se perceber que após aberto o chaveamento do semáforo para verde (ponto 6 na Figura 4.6), onde é traçada uma reta que indica o início de descarga da fila, com inclinação de 40 LPU/intervalo, já que cada intervalo possui

Tabela 4.2: Modelo de Fila no sistema SCOOT com o *Vega Profile*.

Intervalo	Ocupação	Fila	R/G	Vega
1	16	22	RRRR	22
2	18	40	RRRR	40
3	2	42	RRRR	42
4	16	58	RRRR	58
5	2	60	RRRR	60
6	16	66	RRRG	76
7	2	28	GGGG	78
8	18	6	GGGG	96
9	18	0	GGGG	114
10	2	0	GGGR	116

um $t_s=4s$, descrevendo assim o processo de descarga dos veículos. A via não está sobre-saturada, pois a curva do perfil de chegadas de veículos se encontra com a reta de descarga da via.

**Figura 4.6:** *Vega Profile* - Modelo SCOOT

Outra informação fundamental que está presente no modelo de fila do sistema SCOOT é a característica de formação e descarga da fila, podendo ser construído um modelo que mostra o comportamento durante o ciclo semafórico da via. Observar na Figura 4.7 a formação e descarga da fila, em LPU, durante todo o ciclo semafórico, verifique ainda que a fila é totalmente descarregada atingindo o valor de zero de tamanho de fila, no intervalo 9. Este modelo de carga e descarga de fila mostra

alguns índices de desempenho que devem ser estudados, pois fornecem informações para os otimizadores SCOOT. O índice apresentado é o tamanho de fila e consequentemente tem-se o atraso veicular durante o ciclo.

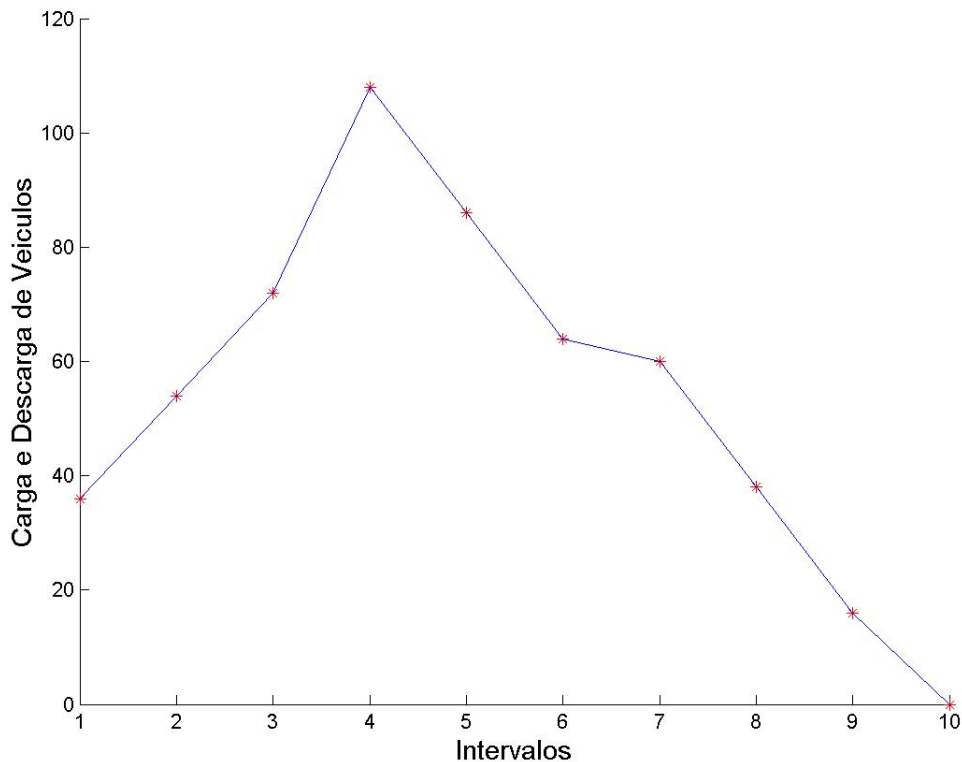


Figura 4.7: Modelo de Formação e Descarga de Fila - Modelo SCOOT

4.5. Modelos de Otimização da Estratégia SCOOT

Os valores das alterações incrementais são calculadas por três otimizadores, as características básicas dos otimizadores estão resumidas abaixo:

otimizador de *split* - alguns segundos antes da mudança de fase é realizado o cálculo para três situações distintas: aumento do tempo de verde em alguns segundos, diminuição ou se mantém no valor atual. O objetivo é minimizar o grau de saturação máximo nas aproximações da interseção. Este otimizador atua a cada mudança de estágio;

otimizador de *offset* - opera em cada interseção e uma vez a cada ciclo. A informação do CFP é usada para estimar se uma alteração no *offset* será implementada ou não para promover uma progressão do tráfego nas vias. A função objetivo deste otimizador é a minimização do atraso, paradas e congestionamento;

otimizador de ciclo - o modelo SCOOT implementa uma duração de ciclo comum para cada seção (sub-rede) de semáforos com objetivo de obter coordenação entre os semáforos. O otimizador

de ciclo pode variar a duração do ciclo para cada sub-rede, em incrementos de poucos segundos (4 a 8), em intervalos não menores que 2 minutos e 1/2 a 5 minutos. A duração do ciclo é otimizada com o critério de maximizar o grau de saturação para operar as interseções com um alto carregamento, em torno de 90%. Este otimizador atua a cada 2,5 ou 5 minutos.

Os aspectos construtivos e técnicas utilizadas serão discutidas mais detalhadamente nas seções seguintes.

4.5.1 Otimização de *Split* - Tempo de Verde

O objetivo deste otimizador é modificar o tempo de um estágio dentro de um ciclo, alterando-o sem interferir no tempo total de ciclo. O otimizador de *split* atua 5 segundos antes do instante previsto para mudança de estágio dentro de um ciclo. Desta forma, no quinto segundo anterior ao instante previsto para a mudança de estágio, uma decisão é tomada pelo otimizador, determinando se encurta o estágio em 4 segundos, se mantém a mesma duração do estágio ou se prolonga o estágio em 4 segundos. Após a tomada de decisão, no ciclo seguinte o instante previsto para tomada de decisão terá um acréscimo de 1 segundo caso a decisão no ciclo anterior tenha sido prolongar o estágio ou terá um decréscimo de 1 segundo caso a decisão no ciclo anterior tenha sido encurtar o estágio e será mantido em caso de decisão de se manter o estágio no ciclo anterior.

A otimização tem como parâmetro de decisão, o quadrado do grau de saturação das vias da intersecção. O grau de saturação é calculado pela Equação 3.2. O cálculo do grau de saturação depende do fluxo detectado e também da fila acumulada até o instante que antecede a tomada de decisão, assim supõe-se os 3 casos: aumento, diminuição ou permanência do tempo do estágio para cada via. Em seguida, a decisão é determinada pela escolha do menor dos máximos quadrados do grau de saturação.

4.5.2 Otimização de *Offset* - Defasagem de tempo

Este modelo de otimização altera o tempo total de ciclo, por isso, conseqüentemente, interfere no tempo de defasagem entre os ciclos de uma via. O otimizador de *offset* atua uma vez a cada ciclo, tomando uma decisão no meio do estágio principal e implementando-a, somente no próximo ciclo. A decisão pode ser aumentar 4 segundos, manter o valor atual ou diminuir 4 segundos dentro do tempo do estágio principal do ciclo. Assim, a nova decisão é tomada com base no valor obtido no ciclo anterior.

O parametro de decisão do otimizador de *offset* é tomada com base no menor valor do índice de desempenho ($H_l(t)$) das vias l para a intersecção até o instante t . O índice de desempenho é determinado por:

$$H_l(t) = D_l(t) + P_l(t) + B_l(t) \quad (4.2)$$

onde $H_l(t)$ é o índice de desempenho de cada via l até o instante t , $D_l(t)$ é o atraso veicular até um determinado instante t , $P_l(t)$ é o número de paradas multiplicado por um fator de penalidade e $B_l(t)$ é o índice de congestionamento detectado, quando houver.

O índice de desempenho é calculado supondo os 3 casos: aumento, diminuição ou permanência do tempo de *offset* para cada via da intersecção semaforizada. Em seguida, é realizado o somatório de cada decisão (aumento, permanência ou diminuição). Desse resultado é tomada a decisão do que tiver o menor valor de $H_l(t)$.

4.5.3 Otimização de Ciclo

O otimizador de ciclo atua uma vez a cada 5 minutos. Entretanto, em determinadas condições de tráfego, o otimizador pode atuar a cada 2,5 minutos. A passagem de 5 para 2,5 minutos é automática em condições crescentes de ciclo. Este otimizador tende a minimizar o tempo de ciclo de forma a atingir um nível de saturação desejado para uma determinada região de controle do sistema SCOOT.

Para cada intersecção é calculado um ciclo denominado: ciclo ideal (*ideal node cycle time*). Esse ciclo é calculado em função do nível de saturação desejado para a via mais saturada da intersecção. No modelo SCOOT, o nível de saturação desejado é conhecido como *target saturation* e normalmente está em torno de 90%.

O ciclo ideal é calculado para cada intersecção de uma região:

$$C_i^* = \frac{x_l' \cdot C_i \cdot x_l^{máx}}{ts \cdot C_i - ns \cdot (C_i - m_i)} \quad (4.3)$$

onde C_i^* é o tempo de ciclo ideal calculado, ts nível de saturação desejado para a área de controle (*target saturation*), C_i é o tempo do ciclo corrente para intersecção i , m_i é o tempo perdido da intersecção i (*lost time*), x_l' é o grau de saturação desejado, ns é o nível de saturação da via mais saturada da intersecção e $x_l^{máx}$ é o grau de saturação da via, l , mais saturada da intersecção (valor expresso em porcentagem, ex.: 90%).

O tempo perdido é considerado igual a zero para o modelo proposto neste trabalho, por isto é apresentada no Capítulo 5 uma estratégia análoga para o tempo de ciclo ideal para o nível de saturação desejado.

Se qualquer via da intersecção tiver grau de saturação maior que nível de saturação desejado, então o seu ciclo ideal é aumentado até que se tenha um valor próximo ao *target saturation*. Caso contrário, se todas as vias da intersecção tiverem o grau de saturação menor que o nível de saturação desejado, então seu o ciclo ideal é diminuído até atingir um valor próximo.

Deve ser determinado um valor de ciclo mínimo prático de uma intersecção, este deve ser um número inteiro maior que o valor de ciclo ideal que seja múltiplo de 4, 8 ou 16 e que seja mais próximo ao valor de ciclo ideal. Assim, para se determinar o ciclo da região, basta pegar o maior valor de ciclo mínimo prático da região. Caso haja mudança de ciclo, o sistema repete pelo menos uma vez o ciclo anterior, antes da mudança.

4.6. Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados os conceitos para o modelamento de detecção veicular, formação de fila, controle e otimização da estratégia SCOOT. São através desses modelos que se pode quantificar os índices de desempenho de um sistema de controle de tráfego. Pois, foram propostos os modelos de formação de fila que mostram de forma concreta o atraso veicular em uma via, bem como o tamanho máximo de fila acumulada num determinado ciclo ou o número de paradas.

A projeção do fluxo veicular utilizado na construção dos CFP's das vias de cada intersecção traz várias informações tanto sobre o comportamento do fluxo e a característica de desempenho do modelo de tráfego. Outro importante aspecto neste capítulo é a descrição detalhada dos modelos de otimizadores que possibilitam sua implementação através da programação matemática.

As grandes flutuações de demanda são acompanhadas pelo acúmulo de pequenas, mas frequentes, modificações na programação semafórica, minimizando distúrbios causados ao tráfego pela mudança na programação. Pode-se dizer que o SCOOT responde, e não reage antecipadamente, às variações de tráfego [23].

Capítulo 5

Modelo de Simulação e Controle de Tráfego Proposto

Com base nos modelos apresentados no Capítulo 4, são desenvolvidos os algoritmos que realizam a simulação e o controle de tráfego urbano. Para isso tornou-se necessário a implementação de um modelo de geração de veículos que forneça dados de ocupação do sistema de detecção veicular, em outro momento, para haver uma confiabilidade na simulação dos resultados, foi desenvolvido também, um modelo do sistema de detecção que atribui os valores em LPU às ocupações medidas pelos algoritmos de detecção.

Para os modelos de controle foram necessários o desenvolvimento de algumas matrizes e vetores de suporte para a obtenção de alguns resultados, pois em determinados casos, os controladores dependem de informações do tempo em segundos e nos modelos de simulação (Capítulo 4) propostos são apenas considerados para a análise de resultados as implementações baseadas nos intervalos totais (acumulados de 4 segundos).

Desta forma, para este capítulo são desenvolvidos todos os modelos propostos, equações e suas respectivas considerações para os algoritmos de programação que realizam a simulação de tráfego e também o sistema de controle e distribuição dos tempos semafóricos.

Para o desenvolvimento dos algoritmos foi utilizado o MatLab.

5.1. Modelo de Tráfego e de Tempos Semafóricos

Para cada intersecção são consideradas indicações semafóricas iniciais. O sistema é modelado através de equações de estado. Desta forma, tem-se as equações de estado que descrevem a indicação semafórica:

$$v_i(t+1) = u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (5.1)$$

onde $v_i(t) \in \{0, 1\}$ é o estágio vigente na interseção i , sendo que $v_i(t) = 0$ significa indicação semafórica verde e $v_i(t) = 1$, indicação semafórica vermelha; $u_i(t) \in \{0, 1\}$ é o valor do controle a ser implementado e I é o número de interseções do sistema. O sistema considera apenas dois estágios, com tempo de amarelo e vermelho total nulos.

A equação que define o tempo de vigência em um determinado estágio (Equação 5.2) é modificada através do algoritmo de controle e otimização de *split* ou pela coordenação imposta pelo otimizador de ciclo que neste último é feita regulando o tempo de ciclo e consequentemente o *split*.

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + 1 & \text{se } u_i(t) = v_i(t) \\ 0 & \text{se } u_i(t) \neq v_i(t) \end{cases} \quad (5.2)$$

onde $w_i(t)$ é o número de períodos decorridos no estágio vigente.

Para o desenvolvimento do modelo de tráfego utilizou-se como base uma representação simplificada de um sistema de tráfego urbano, composto por 3 interseções que recebem 2 vias cada. Estas vias têm um único sentido de tráfego, conforme a Figura 5.1.

O grafo da Figura 5.1 apresenta o modelo de tráfego proposto para geração e simulação de resultados.

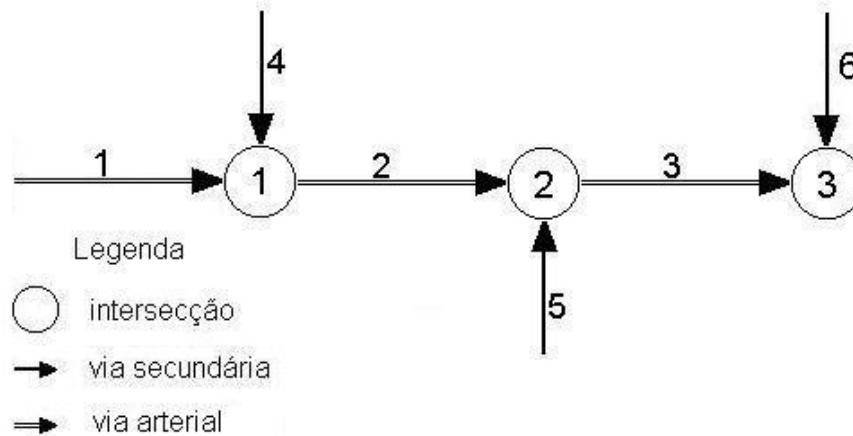


Figura 5.1: Grafo da rede de tráfego com 3 interseções.

Com base neste modelo de grafo, foram implementados os algoritmos de geração de veículos que ocuparão as vias desse modelo, o sistema de detecção, os algoritmos de controle, bem como a geração de uma matriz de fila referente ao comportamento de cada via. Esses algoritmos serão discutidos nas seções a seguir.

5.2. Geração de Veículos

O algoritmo de geração de veículos foi implementado para o modelo proposto com base em alguns tópicos que são contemplados especificamente para este trabalho:

- implementação de geração de veículos com tempo de amostragem;
- estimativa de geração, baseada no fluxo de veículos;
- geração de veículos para via arterial de entrada e vias secundárias;
- geração de veículos para as vias arteriais (2) e (3), baseado na combinação de fluxo das vias a montante;
- números de vias (arteriais e secundárias);
- distribuição do fluxo de veículos, através de porcentagem de nível de ocupação total da intersecção;

As proporções geradas de veículos obedecem uma relação de balanceamento, 55% para via principal e 45% para vias secundárias e de desbalanceamento, 80% para via principal e 20% para vias secundárias. A geração de veículos para as vias compostas são sempre na proporção de 80% oriundos da via principal e 70% da via secundária. A capacidade de intersecções e das vias são de 1800 veículos por hora (vph), não é considerado o tempo de amarelo, tempo perdido e de vermelho total).

Tabela 5.1: Proporção de fluxos nas vias.

Caso	Arterial	Secundárias
desbalanceado	80%	20%
balanceado	55%	45%

São realizadas duas situações distintas de geração de veículos a ocuparem as vias, sendo a ocupação é considerada por intersecção:

- alto - 90% da capacidade da intersecção, ou seja, um total de 1620 veículos por hora (vph);
- médio - 60% da capacidade da intersecção, ou seja, um total de 1080 vph.

De acordo com a Tabela 5.1 e a ocupação da vias serão consideradas as seguintes terminologias: BM - distribuição balanceada e carregamento médio, BA - distribuição balanceada e carregamento alto, DM - distribuição desbalanceada e carregamento médio e DA - distribuição desbalanceada e carregamento alto.

Baseado nesse nível de ocupação, trabalha-se com uma porcentagem de ocupação da via semaforizada, ou seja, é proposto uma relação percentual de distribuição entre via secundária e principal. Para a geração de veículos para as vias compostas, também são utilizadas relações percentuais de distribuição em que a via composta receberá das vias principal e secundária uma parcela de veículos gerados. Em todos os algoritmos foram considerados que a ocupação das vias operavam abaixo da saturação.

O modelo proposto gera um vetor de ocupação veicular que será identificado pelo sistema de detecção. A geração de veículos tem característica principal de uma distribuição constante.

5.3. Sistema de Detecção

O sistema de detecção é composto basicamente por 3 partes:

- sistema de detecção em LPU por intervalo (tempo acumulado de 4 segundos), em que são identificados o acumulo total de LPU por intervalo t_s ;
- sistema suporte de detecção para os controladores, em LPU por segundo, este sistema de detecção trabalha de forma análoga ao item anterior, porém os algoritmos de controle necessitam também de uma detecção em LPU por segundo;
- algoritmo de contagem de veículos e taxa estimada de fluxo veículos por hora.

A composição do sistema de detecção por LPU é baseada no modelo apresentado na Seção 4.3. Com base no vetor amostra de geração de veículos, o modelo matemático gera um vetor de detecção expressos em termos de LPU da ocupação detectada para cada via.

O algoritmo proposto gera uma matriz de ocupação para cada intervalo de cada via. A Tabela 5.2 mostra uma matriz-exemplo gerada para o modelo de tráfego proposto, onde tem-se um total de 40 segundos de amostra (10 intervalos) para vias arteriais e vias secundárias.

Tabela 5.2: Matriz de Ocupação gerado pelo algoritmo do Sistema de Detecção (em LPU).

Via	Intervalos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	36	18	18	36	18	18	36	18	18	18
2	36	18	18	36	18	18	36	18	18	18
3	36	18	18	36	18	18	36	18	18	18
4	18	0	18	0	18	0	18	0	0	0
5	18	0	18	0	18	0	18	0	0	0
6	18	0	18	0	18	0	18	0	0	0

As linhas da Tabela 5.2 representam as detecções de veículos em LPU.

Com base nas distribuições atribuídas no algoritmo de geração de tráfego, o sistema de detecção fornece também a contagem de veículos gerados. Para este algoritmo de contagem são considerados que a cada grupo de 3 ocupações identificadas é feita a contagem de 1 veículo. Com base nisso é gerado também um vetor de contagem de veículos durante o tempo de simulação e geração de veículo.

Tabela 5.3: Vetor de contagem de veículos (unidade).

	Vias					
	1	2	3	4	5	6
Total de Veículos	13	13	13	4	4	4

Para a contagem baseada na ocupação detectada mostrada na Tabela 5.2 é gerado o vetor de contagem de veículos para cada via durante todo o tempo de amostragem. Observar que o tempo de

amostragem é relativamente pequeno, apenas 40 segundos, nestes casos o algoritmo tende a aproximar a distribuição percentual dos veículos que ocupam as vias.

5.4. Algoritmos de Controle

Os algoritmos de controle geram um vetor de tempos semafóricos para cada intersecção do modelo proposto, são gerados 3 planos semafóricos para cada ciclo, resultando em 2 estágios para cada intersecção, pois os estágios para as vias que chegam na mesma intersecção são complementares. Para este modelo não foram considerados os tempos de transição de estágio ou *tempos perdidos*. Os controladores geram um vetor de tempo semafórico com os tempos de verde (0) e de vermelho(1). Esse vetor sinal é implementado com base nas medições de fluxo veicular geradas pelo algoritmo de detecção, baseada nos critérios de decisão dos controladores semafóricos. Para este trabalho foi considerado um valor inicial para a razão de tempos de verde e vermelho de 50%, ou seja, para um ciclo de 60 segundos o tempo de verde será 30s e vermelho 30s.

5.4.1 Controlador de Distribuição de Verde

O otimizador de *split* altera o tempo de vigência do estágio a ser otimizado na intersecção. O tempo de vigência, $w_i(t)$, é modificado aumentando-o de 4 segundos, diminuindo-o de 4 segundos ou mantendo o tempo atual de vigência de estágio.

Os tempos de incremento e decremento de 4 segundo são escolhidos e devem ser verificados se trarão benefícios significativos ao desempenho do sistema [21].

São realizados três testes e o melhor resultado define a alteração de estágio. São testados as situações de prolongamento de estágio verde em 4 segundos (t), encurtamento de estágio t e a permanência do estágio no mesmo tamanho do ciclo anterior. A decisão ocorre no quinto segundo anterior à mudança de estágio.

O critério de decisão para a mudança é baseado no valor do fluxo de saturação medido para as vias em conflito em cada intersecção. Desta forma, têm-se os três casos de testes preliminares que servem de base para a tomada de decisão. Para o caso de aumento de tempo vigente de estágio têm-se:

$$w_i^*(T + 1) = w_i(t) + 8 \quad \text{para} \quad (x_i^a)^2 \quad (5.3)$$

Na Equação 5.3 o tempo de estágio é aumentado em 4 segundos, já que a instante T da tomada de decisão acontece no final do quinto segundo anterior à mudança de estágio, logo o tempo de vigência de estágio é prolongado em 8 segundos, contados os 4 para o tempo restante de estágio mais os outros 4 para o aumento do mesmo. Analogamente à Equação 5.3, para o caso de diminuição do tempo de vigência de estágio:

$$w_i^*(T+1) = w_i(t) \quad \text{para} \quad (x_i^d)^2 \quad (5.4)$$

E para a permanência do tempo de vigência de estágio:

$$w_i^*(T+1) = w_i(t) + 4 \quad \text{para} \quad (x_i^m)^2 \quad (5.5)$$

O algoritmo de controle faz uma varredura em todo o tempo de ciclo gerado no vetor que compõe os sinais semafóricos para uma intersecção. E no quinto segundo anterior à mudança de estágio o algoritmo de otimização de *split* atua, gerando as condições para minimizar a função x_l^2 . Realiza-se o cálculo do grau de saturação até o momento do teste:

$$x_l(t+1) = \frac{f_l(t) \cdot C_i}{s \cdot g_l} \quad (5.6)$$

onde $x_l(t)$ é o grau de saturação, $f_l(t)$ é fluxo detectado até o instante t , C_i é o tempo total de ciclo vigente da intersecção i , s é o fluxo de saturação da faixa considerada, g_l é o quantidade de tempo de verde efetivo para a via l . Neste caso o verde efetivo é igual ao tempo de verde, pois foi desprezado o tempo perdido.

Da Equação de estado 5.6 é gerado uma matriz para tomada de decisão, como é mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Matriz de Valores para tomada de decisão do Controlador de *Split*.

Via	Prolonga		Mantém		Encurta	
	x	x ²	x	x ²	x	x ²
1	0,92	0,85	1,07	1,14	1,29	1,66
4	0,88	0,77	0,57	0,33	0,65	0,43
máx		0,85		1,14		1,66

A decisão é baseada no menor valor dos máximos do grau de saturação para as 3 condições propostas: aumento, diminuição ou permanência de tempo de estágio vigente:

$$x^* = \min(\text{máx}((x_l)^2)) \quad (5.7)$$

onde x^* é o menor dos máximos do grau de saturação que indicará a tomada de decisão.

Neste caso a decisão implementada é o incremento do estágio 1, já que o menor dos máximos (0,85) dos respectivos graus de saturação é o de prolonga estágio:

A Tabela 5.4 foi obtida a partir de simulação do modelo proposto neste trabalho. Observe que para os respectivos graus de saturação, calculados a partir do fluxo detectado, supondo as 3 condições

de teste, o controlador indica pela tomada de decisão que deve haver um incremento no estágio 1, que no caso é porcentagem de verde para a via principal 1, para atender a demanda detectada nas vias de acesso a essa intersecção semaforizada. Estes resultados foram obtidos para uma ocupação de 90% e com distribuição balanceada entre via principal e secundária.

5.4.2 Controlador de Defasagem

Este controlador possui um problema semelhante ao otimizador de *split*, porém este algoritmo faz a varredura do tempo total de amostragem, pois a decisão é tomada no meio do estágio principal e sendo implementado somente no ciclo seguinte.

O modelo calcula o índice de desempenho para cada via da intersecção, os critérios de desempenho são: o atraso veicular, o número de paradas e o índice de congestionamento, porém este último critério não será utilizado por se tratar de fluxo insaturados, ou seja, sem congestionamento. O atraso é numericamente igual a área do gráfico de carga e descarga de fila e o número de paradas é o somatório de tamanho de fila acumulada durante o tempo de vermelho. Para este modelo foi somente utilizado o critério de desempenho do atraso veicular.

$$A_g(i) = D_l \quad (5.8)$$

onde A_g é o valor numérico da área do gráfico de carga e descarga de veículos, D_l é o atraso veicular da via l .

Passando para um t de amostragem discreto:

$$D_l(t) = \sum_{i=1}^{C_i} q_l(t) \quad (5.9)$$

onde $D_l(t)$ é o atraso veicular até o instante t , $q_l(t)$ é a fila acumulada até o instante t , C_i é o tempo ciclo da intersecção i .

Desta forma, pode-se calcular o atraso total para várias vias L : $l \in L$, onde L é conjunto de todas as vias.

$$D_l(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{C_i} q_l(t) \quad (5.10)$$

Monta-se uma matriz de decisão para o controlador de *offset*, observe que esta matriz visa otimizar o atraso nas vias de chegada da intersecção semaforizada.

A decisão é tomada através da escolha da menor soma do índice de desempenho. Um resultado de decisão do controlador de *offset* é apresentado na Tabela 5.5, os parâmetros do modelo de tráfego são os mesmos apresentados na Tabela 5.4, distribuição balanceada e ocupação alta (90%). Neste caso o controlador busca manter o *offset* de 16s.

Tabela 5.5: Matriz de Valores para tomada de decisão do Controlador de *Offset*.

Via	Prolonga	Mantém	Encurta
1	2,17	2,42	2,59
4	1,45	1,14	1,00
Soma	3,62	3,56	3,59

5.4.3 Controlador de Ciclo

Este controlador objetiva coordenar as inteseções semaforizadas de uma região, pois a regulação de tempos de ciclo é um dos pré-requisitos para coordenação das interseções. Os critérios de decisão envolvem o comparativo das inteseções entre si, visando uma correção em eventuais discrepâncias de tempos de ciclo para cada via. Dos controladores implementados para este trabalho, este é o único que tem caráter explicitamente centralizado, pois regula o tempo de ciclo para uma determinada região de controle do sistema.

O controlador de ciclo utiliza como base de critério de decisão o nível de saturação desejado para a via. Isso porque tenta regular o tempo semafórico, mantendo o nível de saturação dentro de uma percentagem de ocupação, suprimindo tanto ociosidade, no caso da via ter um tempo de ciclo que a deixe sub-saturada, quanto excesso de ocupação, no caso da via estar com o nível de saturação acima do que suporta.

Para este modelo é calculado para cada interseção, o valor do ciclo ideal, onde foi estabelecido em 90% o nível de saturação desejado. Antes disso, cada inteseção deve buscar em cada via o maior nível de saturação, pois será esse o nível de saturação da interseção.

No modelo proposto a regulação do tempo de ciclo será calculada baseada na Equação 5.6, com valor desejado para o grau de saturação de 90%. Assim, basta ter o fluxo médio veicular, $f_l^{médio}$, e o grau de saturação desejado, x'_l , para se obter uma relação de proporção de verde que regule o ciclo da área controlada.

Para cada interseção, i , escolhe-se a via l , que possua o maior nível de saturação, ou seja, o grau de saturação máximo da interseção passa a ser o representante da interseção:

$$x_i^{máx}(t) = \max\{x_l(t)\} \quad (5.11)$$

onde $x_i^{máx}(t)$ é o maior grau de saturação de cada interseção, i , $x_l(t)$ é o grau de saturação de cada via l da interseção e $l \in L'$, L' conjunto de vias que chegam na interseção i .

Desta forma é escolhido o $x_i^{máx}$ de cada intereseção i , que terá como representante da interseção o tempo de ciclo para tomada de decisão.

$$x' = \frac{f_l^{méd}(t) \cdot C_i^{ideal}}{s \cdot g_i} \quad (5.12)$$

Reorganizando a Equação 5.12, para o cálculo do tempo de ciclo ideal para o conjunto de interseções I :

$$C_i^{ideal} = \frac{x' \cdot s \cdot g_i}{f_l^{med}(t)} \quad (5.13)$$

onde x' é o grau de saturação desejado para cada interseção i , no caso 90% (0,9), $f_l^{med}(t)$ é fluxo médio detectado até o instante t , C_i^{ideal} é o tempo de ciclo ideal para o x'_i desejado, s é o fluxo de saturação da faixa considerada, g_i é o verde efetivo para o grau máximo de saturação da via que representa a interseção i .

Baseado na Equação 5.12 é implementado um vetor de decisão com valores práticos mínimos de ciclo, para cada interseção.

Tabela 5.6: Vetor de Ciclo Mínimos para tomada de decisão do Controlador de Ciclo.

Interseções	1	2	3
Ciclos Mínimos	44	52	48

A decisão é tomada com base no maior ciclo mínimo identificado; no caso o ciclo da região será 52 segundos, conforme a Tabela 5.6.

5.5. Matriz de Filas

Esta matriz é uma matriz de resultados gerados após otimização, tendo os tempos de indicação ótimos aplicados ao modelos de tráfego. A matriz possibilita a *plotagem* de gráficos do comportamento de fila e dos critérios de desempenho. A matriz utiliza os valores dos tempos de vigência de estágio de verde, $g_l(t)$, e vermelho, $g_r(t)$, para compor os resultados de simulação.

Para o modelo de carga e descarga de fila, tem-se a equação de estado de estimativa de filas, em uma faixa, com evolução temporal dada por:

$$q_l(t+1) = \max\{0, q_l(t) + a_l(t) - s \cdot g_l(t)\} \quad (5.14)$$

onde $q_l(t)$ é a fila formada na linha de parada de uma faixa l ; $a_l(t)$ é a ocupação veicular detectada projetada para a linha de retenção; s é o fluxo de saturação e $g_l(t) \in \{0, 1\}$ é o verde efetivo da faixa em questão, sendo $g_l(t) = u_i(t)$ para as faixas arteriais e $g_l(t) = \overline{u_i(t)}$ para as faixas secundárias.

Outra importante equação de estado descreve o perfil de chegadas veiculares:

$$y_l(t+1) = y_l(t) + a_l(t) \quad (5.15)$$

onde $y_l(t)$ são as chegadas veiculares acumuladas até o instante t , $a_l(t)$ é a ocupação veicular detectada.

Tabela 5.7: Matriz de Fila gerada para via principal.

t	$a_l(t)$	$q_l(t)$	$g_l(t)$	$g_l(t)$	$v_l(t)$
1	36	36	4	0	36
2	18	54	4	0	54
3	18	72	4	0	72
4	36	108	4	0	108
5	18	86	0	4	126
6	18	64	0	4	144
7	36	60	0	4	180
8	18	38	0	4	198
9	18	16	0	4	216
10	18	0	0	4	234

Para cada via é gerada uma matriz de filas, pois é ela que descreve o comportamento do fluxo de veículos ao longo do tempo de amostragem.

Para a implementação da matriz de fila, mostrada na Tabela 5.7, são considerados instantes de tempo t , tempo de amostra, espaçados de um período constante t_s , no caso 4 segundos, ou seja: $t_s = t_{j+1} - t_j$. A matriz é composta respectivamente para as seguintes equações de estado, a coluna de $q_l(t)$ é baseada na Equação 5.14 e $v_l(t)$ na Equação 5.15.

A Tabela 5.7 são os resultados registrados de todos os intervalos da amostragem, os veículos detectados (em LPU), a fila acumulada (em LPU), o tempo de vermelho (em segundos), o tempo de verde (em segundos) e o perfil de chegadas (em LPU). Observe que a matriz contém as equações de estado do modelo de tráfego proposto, utilizadas para comprovação, verificação e análise do comportamento de critérios de desempenho e do controle de tráfego.

5.6. Conclusões

Neste Capítulo foram apresentadas as equações de estado que modelam o controle de tráfego proposto e seu funcionamento. Os algoritmos de geração e detecção de veículos desenvolvidos para este trabalho, possuem a característica de serem complementares entre si, pois como a geração de veículos simula as ocupações de veículos sobre os laços indutivos, o sistema de detecção verifica e confirma se houve mesmo a geração correta dos veículos.

Os algoritmos de controle possuem caráter de dependência entre si, já que cada um tem seus critérios específicos de controle e otimização dos estágios. Nota-se, ainda, que alteram constantemente os tempos semafóricos de acordo com os critérios estabelecidos para cada controlador, pois os controladores alteram os tempos de estágio, defasagem ou ciclo dentro de um plano de decisão limitado, possuindo o caráter responsivo citado em [21]. Desta forma, este caráter responsivo busca um controle que atenda as variações de fluxo de veículos que ocorrem muitas vezes na prática de controle de tráfego, conseguindo assim respostas ao fluxo detectado no instante de tomada de decisão.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Foram implementados os modelos propostos no Capítulo 5 para geração de resultados que possibilitem a análise de comportamento do fluxo veicular, bem como a geração de resultados comparativos com outras estratégias de controle de tempos semafóricos.

Para este capítulo são gerados resultados, juntamente com suas respectivas matrizes de fila para que seja possível analisar os critérios de desempenho mais importante em controle de tráfego. É proposto uma comparação com o sistema *offline* de controle de tráfego TRANSYT.

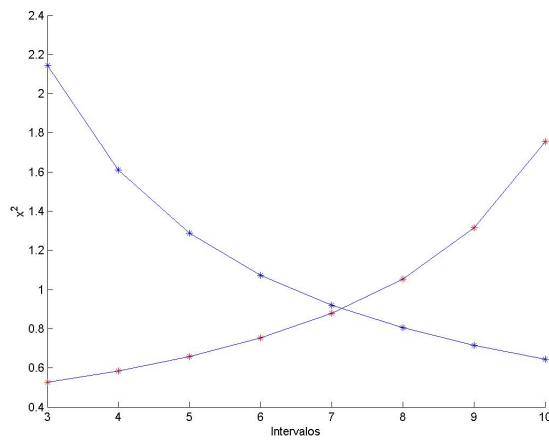
6.1. Resultados de Simulação

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a simulação, bem como as principais informações relevantes para a compreensão, discussão e análise do funcionamento do modelo proposto.

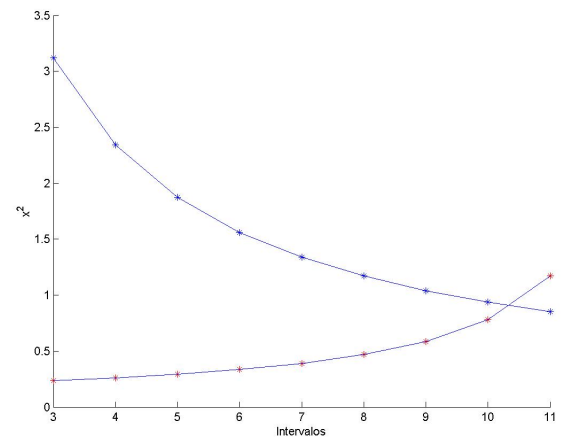
6.1.1 Controlador de *Split*

Analisando a Figura 6.1, pode-se perceber que o controlador de *split* trabalha apenas com 3 decisões adjacentes de distribuição de verde (aumento, permanência ou diminuição). O algoritmo pode buscar imediatamente um tempo de distribuição de ciclo que atenda simultaneamente as vias da interseção. Porém, o modelo proposto busca ser responsivo para a distribuição de porcentagem de estágio para ambas as vias e ilustra o conjunto de decisões que podem ser implementadas para cada detecção de grupos veiculares.

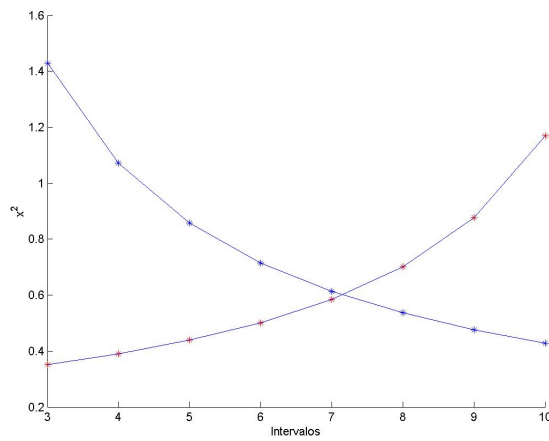
Ainda sobre a Figura 6.1, o algoritmo busca o equilíbrio do grau de saturação de cada via da interseção de acordo com a distribuição do fluxo detectado. Nas simulações de distribuição de ocupação das vias a distribuição da porcentagem de verde acompanha o fluxo detectado. Também, o *split* se distribui proporcionalmente entre os graus de saturação de cada via da interseção.



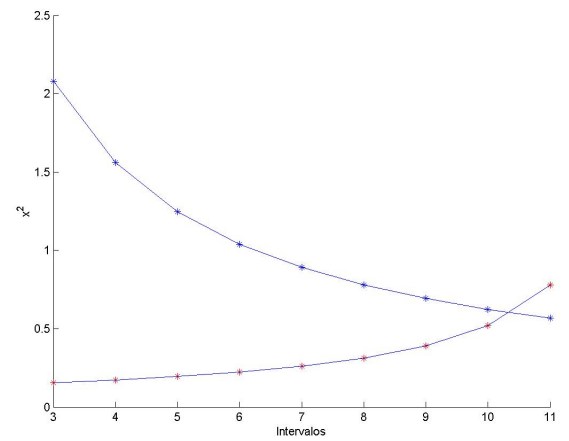
(a) balanceado alto



(b) desbalanceado alto



(c) balanceado médio



(d) desbalanceado médio

Figura 6.1: Graus de saturação da interseção 1 com todo o conjunto de tomada de decisão.

Na Figura 6.2, para a primeira amostra, com apenas 1 ciclo, o otimizador já atua na primeira mudança de estágio. E consegue de forma efetiva descarregar toda a fila acumulada. O controlador atua de forma efetiva no segundo ciclo, conseguindo então descarregar totalmente a fila acumulada do primeiro ciclo mais as chegadas do segundo ciclo. Complementar à via 2 que está localizada na mesma intersecção (intersecção 2) está a via 5, que tem seu tempo de verde reduzido devido o fluxo da via 2 ser maior que a via 5, conforme mostrado na Figura 6.3, exatamente como preve o algoritmo de otimização.

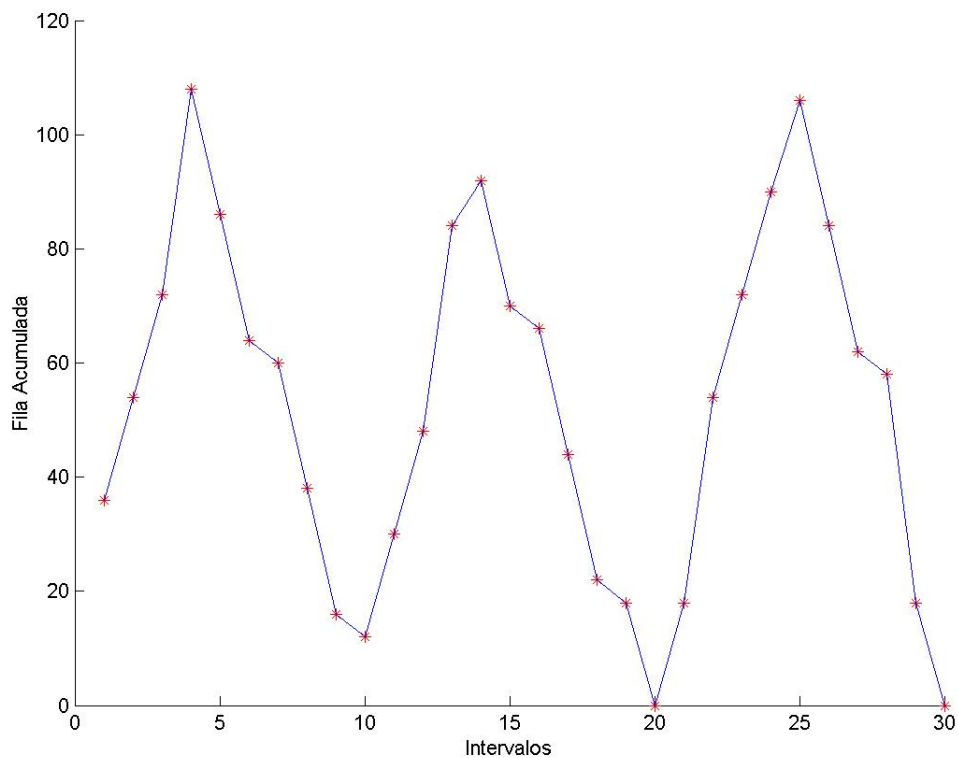


Figura 6.2: Fila na via 2 - Controlador de *Split*

6.1.2 Controlador de Defasagem

Na Tabela 6.1 são mostrados os critérios de desempenho do atraso, de acordo com a defasagem aplicada no ciclo da intersecção em estudo, a defasagem no modelo proposto atua de forma implícita no controle do atraso veicular, pois quando se trabalha com defasagem, este sempre se refere à defasagem entre intersecções. Observe a influência da defasagem nos diferentes tipos de carregamentos e distribuição de ocupação das vias.

Observe que o controlador de defasagem também trabalha de forma responsiva, sempre escolhendo a defasagem que tenha o menor atraso, atendendo às variações de acordo com a formação e descarga de fila no instante da tomada de decisão, visto que o atraso está diretamente relacionada ao comportamento da fila.

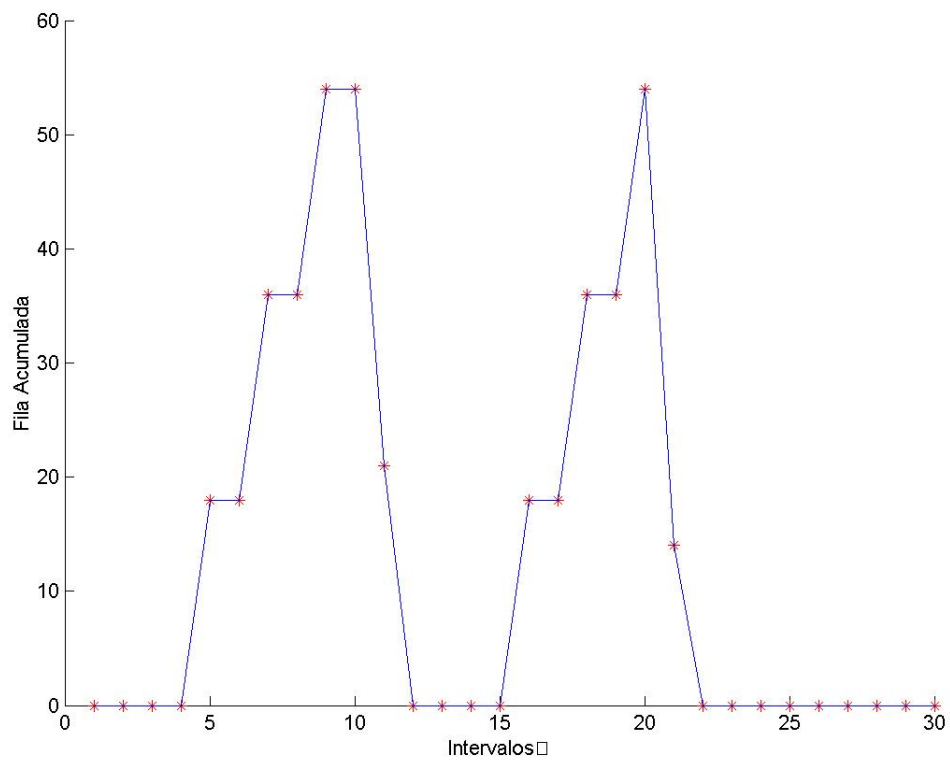


Figura 6.3: Fila na via 5 - Controlador de *Split*

Tabela 6.1: Influência da defasagem no atraso

	BM		BA			DM			DA			
Defasagem (s)	8	12	16	12	16	20	16	20	24	40	44	48
Atrasos (D_i)	2,02	1,97	2,03	3,59	3,56	3,61	1,15	1,14	1,17	2,23	2,13	2,47

6.1.3 Controlador de Ciclo

A Figura 6.4 mostra um perfil de comportamento de fila para um ciclo de 40 segundos e após a atuação do algoritmo de controle de ciclo é gerado um novo comportamento da fila, agora para um ciclo de 44 segundos, visto na Figura 6.5.

Observe que o controlador de ciclo reduz o tamanho da fila desde o primeiro ciclo da amostragem, que antes do controlador ter atuado, o tamanho máximo de fila está em 90 LPU e em seguida a fila atinge pouco mais de 70 LPU. O controlador como já era esperado, busca realizar a coordenação de ciclos de um determinada região, de tal forma que seja utilizado o maior ciclo da região, para um nível de saturação desejado que no caso do modelo proposto foi de 90%.

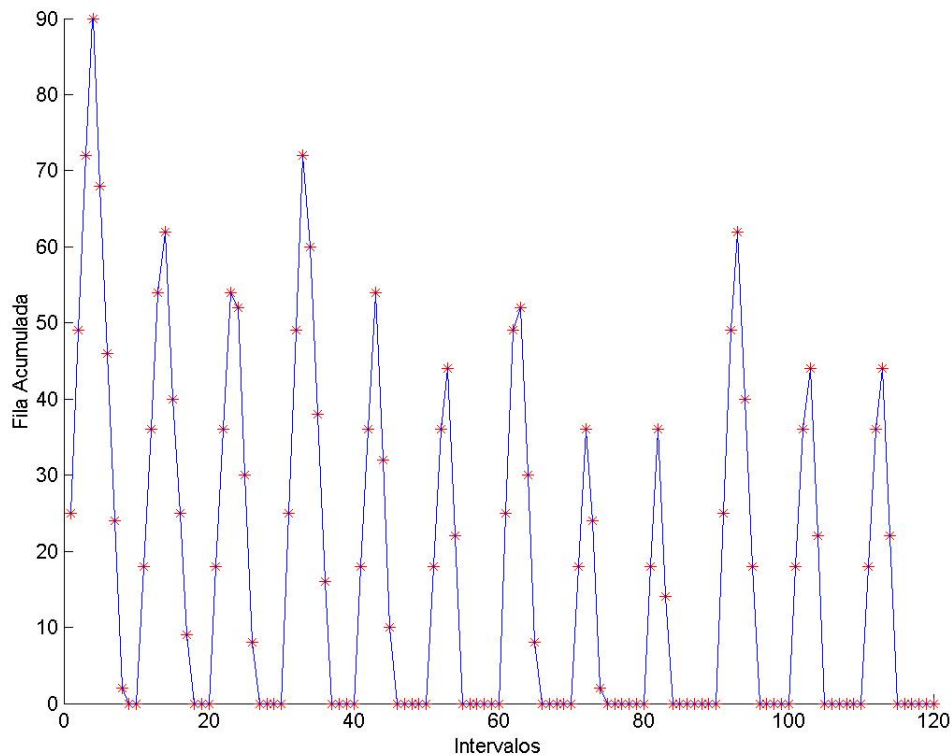


Figura 6.4: Fila na via 1 - Otimizador de Ciclo - $C_1=40s$

6.2. Comparações entre o Modelo Proposto e o TRANSYT

É apresentada na Tabela 6.2, os respectivos valores de atraso obtido para os carregamentos propostos, através do TRANSYT/10 em pcu.h/h e para o modelo proposto pcu.s/s. No modelo proposto como foram considerados tamanhos de veículos contantes e velocidades constantes, cada veículo equivale em média 18 LPU's. Para o comparativo, os atrasos detectados foram passados em unidades de pcu.h/h. Os resultados são de 30 minutos de simulação. As chegadas de veículos para o modelo proposto possuem distribuição constante.

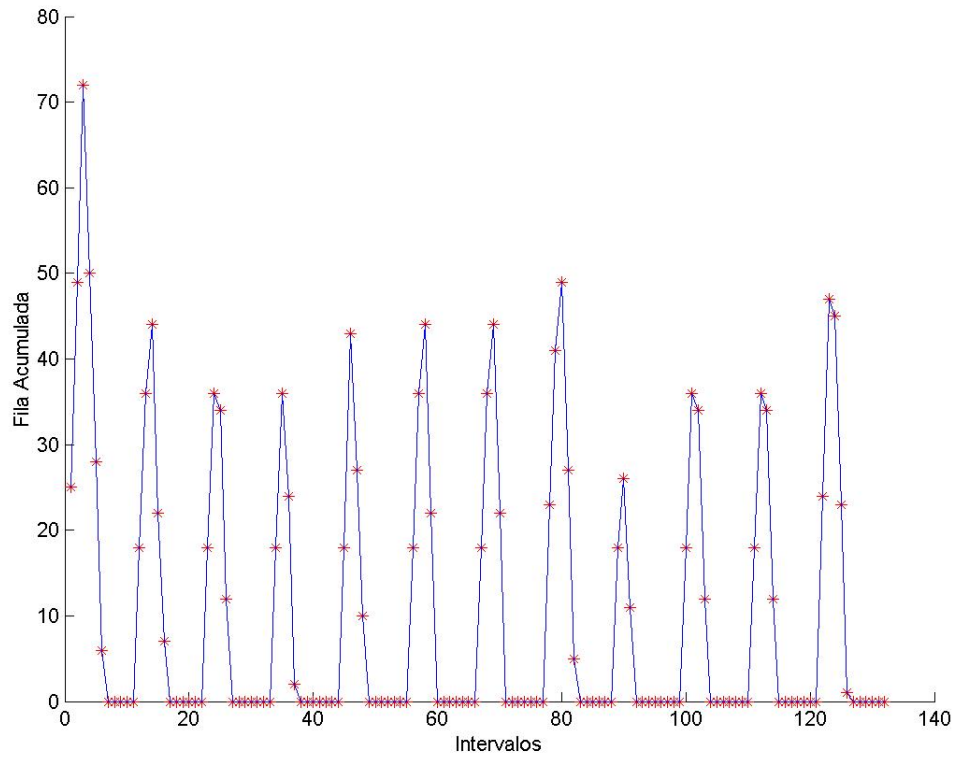


Figura 6.5: Fila na via 1 - Otimizador de Ciclo - $C_1=44s$

Tabela 6.2: Atraso em $pcu - h/h$ (TRANSYT) e $pcu - s/s$ (Mod. Proposto).

	TRANSYT	Mod. Prop.
BA	62,8	12,2
DA	23,0	6,4
BM	14,2	6,8
DM	7,9	3,4

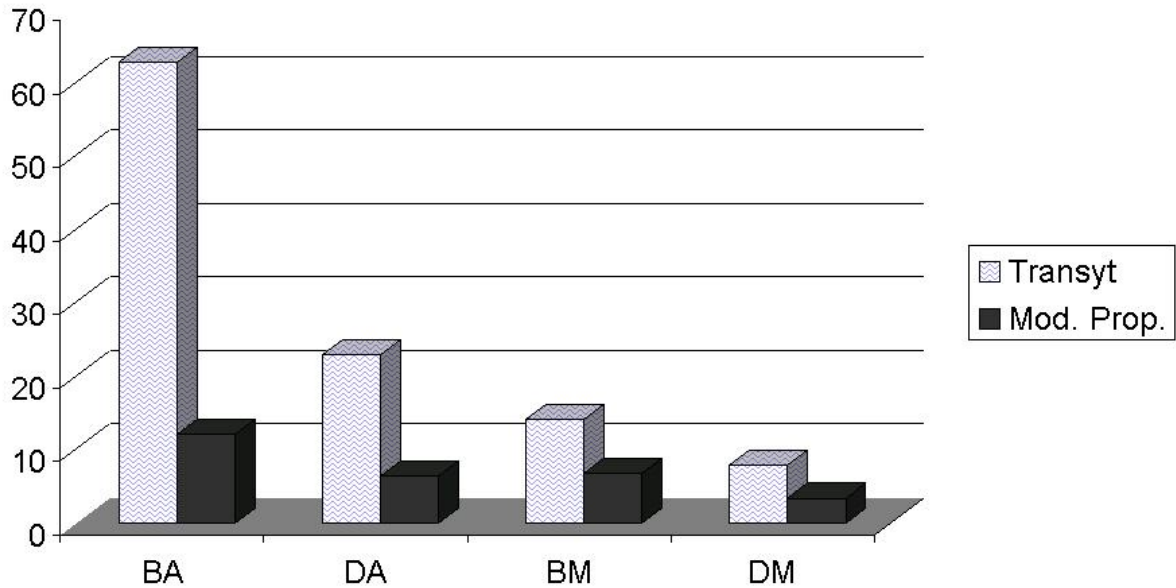


Figura 6.6: Gráfico Comparativo entre os atrasos - TRANSYT x Modelo Proposto

Para os critérios comparativos foi calculada a proporção de melhoria, dada pela Equação 6.1.

$$\text{Proporção} = \frac{T - M}{M} \cdot 100 \quad (6.1)$$

onde, T é o valor de atraso obtido com o TRANSYT e M é o valor de atraso obtido com o algoritmo do modelo proposto.

Na Tabela 6.3 pode-se observar o ganho comparativo do modelo proposto em relação ao TRANSYT. Analisando os resultados verifica-se o ganho em termos de atraso que o modelo proposto em tempo real pode ter em relação ao TRANSYT que é um algoritmo de tempos fixos e não atuado.

Tabela 6.3: Proporção de melhoria do modelo proposto \times TRANSYT.

	Mod. Prop./TRANSYT
BA	415
DA	259
BM	109
DM	132

Ainda sobre a Tabela 6.3, percebe-se que o modelo proposto de controle atuado apresenta um melhor desempenho em relação ao TRANSYT quando existe uma alta ocupação das vias em estudo, no caso, em torno de 90% de ocupação. Já para uma ocupação média, 60%, ainda o modelo proposto possui um desempenho melhor, porém em proporções de ganho um pouco menores quando comparadas ao de alta ocupação.

Um aspecto importante a ser observado é que no alto carregamento (90%) e balanceado (55%, 45%), o ganho em relação ao TRANSYT é maior já que em alguns momentos existe acúmulo de fila,

e como o modelo proposto tenta responder a essas variações obtém um ganho proporcional maior em relação ao TRANSYT que possui estratégia de tempos fixos.

6.3. Comparações para Distribuições Pulsadas e Aleatórias

Para aproximar os resultados simulados de resultados práticos, utilizou-se uma distribuição randômica e pulsada de fluxos veiculares gerados e detectados. Os fluxos veiculares aleatórios obedecem a seguinte característica:

$$0 < f_l(t) < 0,5 \quad (6.2)$$

onde $f_l(t)$ é o fluxo veicular gerado para cada via l , que neste caso é aleatório.

Os fluxos gerados possuem distribuição randômica para cada intervalo até a capacidade de ocupação máxima da via que é de 1800 vph ou 0,5 vps, por isso o limitante de 0 a 0,5 dos valores gerados aleatoriamente.

Tabela 6.4: Comparação entre os atrasos para Distribuições Pulsadas e Randômica

	Randômica		Pulsada		
		BA	BM	DA	DM
D_{total}	12,98	12,61	6,95	6,28	4,28

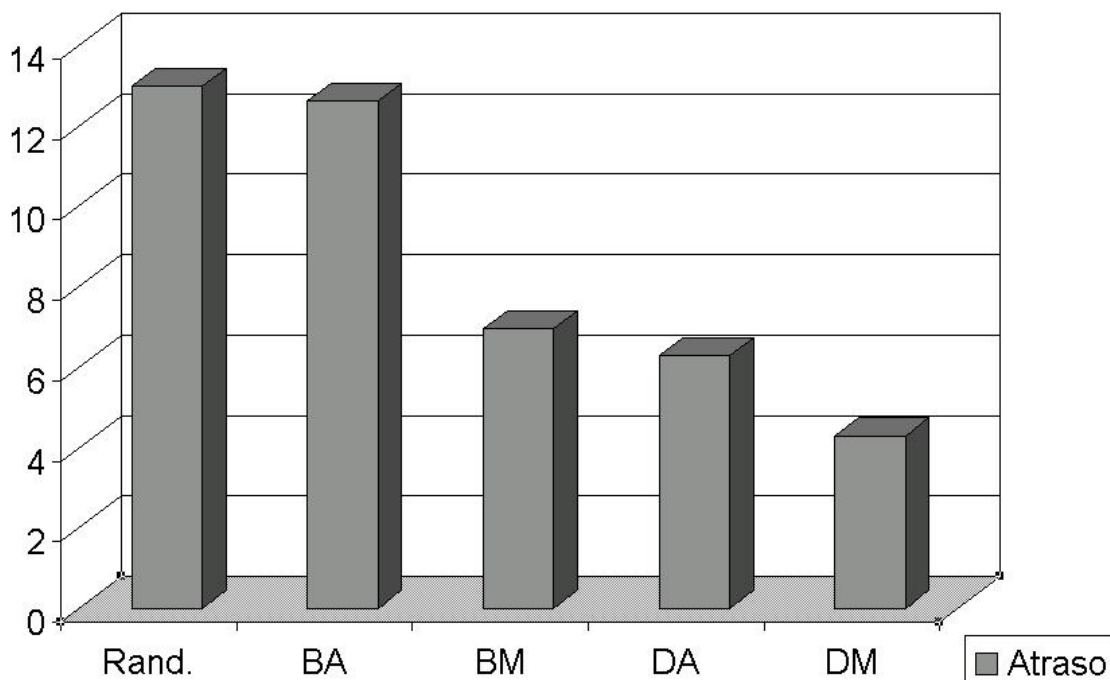


Figura 6.7: Gráfico Comparativo entre os atrasos para os diferentes tipos de geração de veículos

Observe que pelos resultados obtidos de atraso, que mesmo a chegada aleatória possui um atraso que se mantém coerente e próximo ao valor de uma distribuição pulsada balanceada e com alto car-

regamento. A Tabela 6.4 consegue ilustrar que o modelo proposto evolui, respondendo às variações detectadas de fluxo veicular, mesmo com chegadas totalmente aleatórias, mantendo o atraso total dentro de padrões de bom desempenho. O fluxo detectado é o fluxo médio até a tomada de decisão dos controladores do modelo proposto.

6.4. Conclusões

Neste capítulo foram gerados os resultados de tempos semafóricos, bem como o comportamento das vias quando controladas pelos controladores do modelo proposto. Os resultados gerados, mostram satisfatoriamente o desempenho dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho. No caso do otimizador de *split* verifica-se uma resposta adequada à demanda detectada, já que esse otimizador está diretamente relacionado ao grau de saturação das vias de cada intersecção.

O controlador de ciclo consegue alterar o tempo de prolongamento ou diminuição o ciclo, esse ajuste de ciclo consegue reduzir o atraso veicular, diminuindo a ociosidade da via ou readequando o ciclo para uma demanda maior e verificou-se a tendência de redução do tamanho máximo da fila, conseqüentemente atuando de forma positiva na redução de atraso. Vale lembrar que este otimizador tem um papel importante de coordenar os tempos semafóricos das inteseccões entre si.

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas para Trabalhos Futuros

A proposta de desenvolvimento de um algoritmo de controle de tráfego atuado foi realizado com sucesso. O algoritmo calcula tempos semafóricos ótimos, restritos a tamanhos de ciclo, variações de *split* e defasagem.

O algoritmo é o primeiro passo de um projeto na busca de tecnologia de controle de tráfego de baixo custo, aplicado à realidade de tráfego nacional.

Baseada na metodologia apresentada para o desenvolvimento dos algoritmos de controle e juntamente com os resultados simulados e comparados, aumenta a importância de suas contribuições para o projeto de desenvolver um sistema de controle de tráfego aplicado na região de Londrina.

7.1. Conclusões

Existem na literatura e no mercado, várias estratégias de controle de tráfego veicular urbano, porém todos os modelos são sistemas com custos financeiros extremamente elevados, inviabilizando possíveis implementações para cidades de médio e até pequeno porte. Com base neste trabalho desenvolvido, percebeu-se que a estratégia de controle proposta, é extremamente versátil e de relativa facilidade de implementação, pois conta com modelos simples, porém eficazes de controle.

De acordo com o que se tem na literatura sobre o sistema SCOOT espera-se que este reaja às variações aleatórias que ocorrem de ciclo para ciclo, ao mesmo tempo que acompanha a tendência de variação da demanda ao longo do tempo [21]. O modelo proposto neste trabalho possui também a resposta às grandes flutuações de demanda que são acompanhadas pelo acúmulo de pequenas, mas frequentes, modificações na programação semafórica, minimizando distúrbios causados ao tráfego pela mudança na programação. Podendo-se dizer que os algoritmos de controle respondem, e não reagem, às variações de tráfego [23].

Para este modelo foi utilizado o modelo de fila vertical, que desconsidera o tamanho da fila e o tempo de chegada dos veículos na linha de retenção, tornando-se assim proposta para trabalhos futuros, já que nesta pesquisa considera-se que a via é sub-saturada e que o comprimento da via atende ao tamanho máximo de fila atingido, desde que o tempo semafórico de verde consiga efetivamente descarregar a fila.

Uma observação importante que foi percebida ao longo do desenvolvimento deste trabalho é a interação entre os controladores, pois ao mesmo tempo que cada algoritmo leva à melhoria de alguns critérios de desempenho, outro algoritmo compensa problemas gerados, como é o caso em que se houver demanda excessiva o controlador de *split* tenta reduzir ao máximo o grau de saturação da via e neste caso atua também paralelamente o controlador de *ciclo* que tenta expandir os tempos de ciclo para atender a demanda, objetivando reduzir o atraso e o tamanho máximo de fila, além de corrigir discrepâncias entre os tempos de ciclo para cada inteseção da região de controle. É essa interação que coordena as intersecções semaforizadas entre si. E não menos importante, o controlador de defasagem objetiva melhorar os critérios de desempenho de um sistema de controle de tráfego, no caso o atraso.

7.2. Perspectivas

Como existem no mercado outras estratégias de controle, torna-se necessário a existência de literaturas comparativas para análise de desempenho, de custo de implementação, de viabilidade técnica, bem como outros fatores que influenciam a possível escolha por um otimizador e controlador de tráfego veicular urbano que atenda a necessidade de cada cidade ou região.

Os algoritmos desenvolvidos neste trabalho, como o sistema de detecção e os controladores, podem ser utilizados separadamente para uma implementação física. Pois, os algoritmos, mesmo visando buscar uma melhoria geral para os critérios de desempenho do modelo de tráfego, podem de forma satisfatória serem implementados por blocos de controle, sugerindo assim um caráter extremamente flexível e versátil dependendo da solução a ser desenvolvida.

Apêndice A

Publicação e Apresentação

1. W. Endo, S. G. S. Cervantes. Um Algoritmo de Controle de Tráfego Atuado Otimizado baseado na Estratégia SCOOT. In: XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006, Brasília, DF. Anais do XX ANPET.
2. W. Endo, S. G. S. Cervantes. Otimização e Controle de Tráfego Urbano baseado na Estratégia SCOOT. In: Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, 2006, Londrina, PR. Categoria: Banner

Apêndice B

Algoritmos

B.1. Algoritmo do Modelo Proposto

Geração de Veículos

```
%Parametros de entrada para geracao de veiculos
time=40; %Deve ser um tempo multiplo de 4, pois a amostragem e de 4 segundos
vph_G=1800; %Taxa de veiculos gerados - Capacidade de fluxo da via
porcentagem=0.8; %Porcentagem de ocupacao do fluxo da via
distr_P=0.8; %Porcentagem dos veiculos gerados para via principal
inter=3; %Qtdade de interseccoies
via_sec=3; %Qtdade de vias secundarias
via_princ=1; %Qtdade de vias principais
via_comp=via_sec-1; %Qtdade de vias compostas - Vias Intermediarias

distr_S=(1-distr_P); %Porcentagem dos veiculos gerados para a via secundaria
total_vias=via_sec+via_princ+via_comp;

intervalos=time/4;

frac=time*4;
A=zeros(total_vias,frac); %Matriz de geracao de veiculos
vps_G=vph_G/3600; %Taxa de veiculos por segundo
n_G=vps_G*time; %Qtdade de veiculos gerados

%Calculo do numero de veiculos gerados pelo intervalo de tempo
Veic_P=((vph_G*porcentagem*distr_P)/3600)*time;
Veic_S=((vph_G*porcentagem*distr_S)/3600)*time;
Veic_C=Veic_P*0.8+Veic_S*0.7;

%Geracao dos veiculos - para via principal
for ww=1:via_princ
    aux=Veic_P;
    gg=1;
    ii=1;
    for g=1:frac
```

```

        if aux>0;
            for gg=ii:ii+2
                A(ww,gg)=1;
            end
            aux=aux-1;
        end
        ii=ii+12;
    end
end

%Composicao das outras vias - Vias Intermediarias
for xx=1:via_comp
    aux3=Veic_C;
    gg=1;
    ii=1;
    for g=1:frac
        if aux3>0;
            for gg=ii:ii+2
                A(xx+via_princ,gg)=1;
            end
            aux3=aux3-1;
        end
        ii=ii+12;
    end
end

%Geracao dos veiculos - para vias secundarias
for xx=1:via_sec
    aux2=Veic_S;
    gg=1;
    ii=1;
    for g=1:frac
        if aux2>0;
            for gg=ii:ii+2
                A(xx+via_princ+via_comp,gg)=1;
            end
            aux2=aux2-1;
        end
        ii=ii+35;
    end
end

-----
Sistema de Detecção
-----
LPU=zeros(total_vias,time); %Vetor de deteccao por segundo

%Algoritmo que detecta em LPU os intervalos de 4 segundos
for sec=1:total_vias
    x=7;
    j=0;
    k=1;

```

```

    for k=1:intervalos
        for i=1+j:16+j
            %O valor 16 e um intervalo de amostra de 4 segundos com deteccao em 1/4 de seg
            if A(sec,i)==1
                LPU(sec,k)=LPU(sec,k)+x;
                x=x-1;
            elseif A(sec,i)==0
                x=7;
            end
            %%frac=frac+1;
        end
        j=j+16;
    end

%Algoritmo que detecta em LPU a cada segundo
x=7;
j=0;
k=1;
    for k=1:time
        for i=1+j:4+j
            %O valor 4 e equivalente a 1 segundo de amostra com deteccao em 1/4 de seg
            if A(sec,i)==1
                LPUs(sec,k)=LPUs(sec,k)+x;
                x=x-1;
            elseif A(sec,i)==0
                x=7;
            end
        end
        j=j+4;
    end

%Algoritmo de contagem de veiculos
n(sec)=0;
    if A(sec,1)==1
        n(sec)=1;
    end
    for i=2:frac
        if A(sec,(i-1))==0 & A(sec,i)==1
            n(sec)=n(sec)+1;
        end
    end

%Calculo do fluxo de veiculos DETECTADOS
%VPS - Veiculos por segundo
vps(sec)=n(sec)/time;

%VPH - Veiculos por hora DETECTADOS
vph(sec)=vps(sec)*3600;

end
-----

```

```

Algoritmo de Otimização SCOOT
-----
time_ciclo=40; %Este valor sera fornecido pela otimizacao offset
Sinal=zeros(inter, time);
FSat=10; %Considerando Fluxo de saturacao igual a 10 LPU por segundo
Q_1=0;
Q_2=0;

for ka=1:inter
    green=20;
    red=20;
    rx=0;
    rc=0;
    rw=0;
    Q_1=0;
    Q_2=0;
    Q_1x=0;
    Q_2x=0;

    for kb=1:time

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        % Otimizacao do estagio - Qdo e vermelho para verde %
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        if kb==(red+rx)-4

            ka
            kb

            %Detecta a fila acumulada ate o instante de decisao para mudanca de estagio
            for kc=1+rw:kb
                Q_1=Q_1+LPUs(ka,kc);
                Q_2=Q_2+LPUs(ka+3,kc);
            end

            %Calculo do grau de saturacao (x)
            q_1=Q_1/kb;
            q_2=Q_2/kb;

            %Calculo para o link 1 - Supondo aumento de vermelho
            xA1=(q_1/FSat)*(time_ciclo/(green-4));
            xA1=(xA1)^2;
            %xA1
            %Calculo para o link 1 - Supondo diminuicao de vermelho
            xD1=(q_1/FSat)*(time_ciclo/(green+4));
            xD1=(xD1)^2;
            %xD1
            %Calculo para o link 1 - Supondo q mantem
            xM1=(q_1/FSat)*(time_ciclo/green);
            xM1=(xM1)^2;
        end
    end
end

```



```

        X_M2=xA2;
    else
        X_M2=xD2;
    end

    if X_M2>xM2
        X_M2=X_M2;
    else
        X_M2=xM2;
    end
    %X_M2
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %Escolhe a decisao correspondente ao maior X do link 2
    if X_M2==xA2
        dec_X2=3;
    end

    if X_M2==xD2
        dec_X2=1;
    end

    if X_M2==xM2
        dec_X2=2;
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %Escolha do menor X^2 entre os 2 links
    if X_M1<X_M2
        X_final=X_M1;
        dec_final=dec_X1;
    else
        X_final=X_M2;
        dec_final=dec_X2;
    end
    X_final
    dec_final

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Monta o vetor Sinal para cada interseccao %

    %Para o caso de diminuir vermelho
    if dec_final==1
        teste=0;
        teste
        for wa=1+rc:kb
            Sinal(ka,wa)=1;
            Sinal(ka+3,wa)=0;
        end
    end

```



```

        for wa=kb+1:40+rc
            Sinal(ka,wa)=0;
            Sinal(ka+3,wa)=1;
        end
        rx=rx-1;
    end

    %Para o caso de aumentar o vermelho
    if dec_final==3

        for wa=1+rc:kb+9
            Sinal(ka,wa)=1;
            Sinal(ka+3,wa)=0;
        end

        for wa=kb+1+9:40+rc
            Sinal(ka,wa)=0;
            Sinal(ka+3,wa)=1;
        end
        rx=rx+1;
    end

    %Para o caso de manter o vermelho
    if dec_final==2
        for wa=1+rc:kb+4
            Sinal(ka,wa)=1;
            Sinal(ka+3,wa)=0;
        end

        for wa=kb+5:40+rc
            Sinal(ka,wa)=0;
            Sinal(ka+3,wa)=1;
        end
        rx=rx;
    end

    rx=rx+40;
    rc=rc+time_ciclo;

    %Descarrega a Fila
    for kd=1+rw:time_ciclo+rw
        %for kd=1:kb
            if Sinal(ka,kd)==0
                Q_1x=Q_1x+FSat;
            end

            if Sinal(ka,kd)==1
                Q_2x=Q_2x+FSat;
            end
        end
    end
end

```

```

        kd

        Q_1=Q_1-Q_1x;
        Q_2=Q_2-Q_2x;
        Q_1=max(0,Q_1);
        Q_2=max(0,Q_2);

        Q_1x=0;
        Q_2x=0;

        rw=rw+time_ciclo;

    end
end
end

-----
Algoritmo de Otimização SCOOT
-----

Fila=zeros(1,intervalos); %Fila acumulada (Q)
rg=zeros(intervalos,2);
%Matriz de qtdade de vermelhos e verdes por intervalo de 4 segundos

MatFila=zeros(intervalos,6);%Matriz do Modelo de Fila
%MatFila=Coluna 1, Intervalo
%MatFila=Coluna 2, Deteccao (OCC)
%MatFila=Coluna 3, Fila (Q)
%MatFila=Coluna 4, Qtdade de vermelho
%MatFila=Coluna 5, Qtdade de verde
%MatFila=Coluna 6, Vega Profile

dd=1;

for ee=1:total_vias
    kk=40;
    r=0;
    g=0;
    w=0;
    FSat=10; %Considerando Fluxo de saturacao igual a 10 LPU por segundo
    %FSat

    for a=1:intervalos
        MatFila(a,1)=a;
        for b=1:4
            if Sinal(ee, b+w)==1
                r=r+1; %Contagem de tempo de vermelho por intervalo
            elseif Sinal(ee, b+w)==0
                g=g+1; % Contagem de tempo de verde por intervalo
            end
        end
    end
end
end

```

```

rg(a,1)=r; %Coluna 1 contagem de vermelho
rg(a,2)=g; %Coluna 2 contagem de verde

MatFila(a,2)=LPU(ee,a);%Coluna 1=Ocupacao medida pelo detectores
MatFila(a,4)=r; %Coluna 4=Qtidade de vermelho
MatFila(a,5)=g; %Coluna 5=Qtidade de verde

%Fila Acumulada em LPU
if a==1
    ini=0; %Valor inicial de fila acumulada Q(0)
    MatFila(a,3)=max(0,MatFila(a,2)+ini-(MatFila(a,5)*FSat));
else
    MatFila(a,3)=max(0,MatFila(a,2)+MatFila((a-1),3)-(FSat*MatFila(a,5)));
    %Maximo termo entre ZERO e a fila acumulada (Q)
end

%Vega Profile
if a==1
    MatFila(a,6)=MatFila(a,2)+ini;
else
    MatFila(a,6)=MatFila(a-1,6)+MatFila(a,2);
end
%%end

if MatFila(a,5)==0
    Descarga(a)=0;
else
    Descarga(a)=kk;
    kk=kk+40;
end

r=0;
g=0;
w=w+4;

end

%Plotagem do Grafico do Vega Profile - Numero de chegadas
int=zeros(1,intervalos);
pp=1;
for nn=1:intervalos
    Vega(nn)=MatFila(nn,6);
    FilaAcum(nn)=MatFila(nn,3);
    int(nn)=pp;
    pp=pp+1;
end

figure(dd);
plot(int,Vega,'r*');
hold on;

```

```
plot(int,Vega);
plot(Descarga,'b*');
%plot(Descarga);
xlabel('Intervalos');
ylabel('Numero de chegadas em LPU');
hold off;

figure(dd+1);
hold on;
plot(int,FilaAcum,'r*');
plot(FilaAcum);

dd=dd+2;
end
```

Apêndice C

Configuração do sistema TRANSYT

Serão apresentados os dados de entrada necessários para especificação de simulação no TRANSYT. Estes dados representam um caso de carregamento alto, balanceado para uma distribuição constante. Caso seja necessário a configuração para efeito comparativo com o modelo desenvolvido neste trabalho.

- tempo de ciclo = 52 segundos;
- número de passo do histogramas de chegadas = 40;
- tempo de simulação = 30 minutos;
- deslocamento do início de verde efetivo = 2;
- deslocamento do final de verde efetivo = 3;
- fator de escala de fluxo = 100;
- fator de escala de tempo = 100;
- otimização de *split* e *offset*;
- fator de dispersão = 35;
- peso % do atraso = 100;
- peso % de parada = 100;
- arco arterial:
 - fluxo total = 891;
 - fluxo uniforme = 0;
 - tempo de cruzamento (fluxo de entrada) = 40;
 - tempo de cruzamento (fluxo de saída) = 20;
- arco secundário:
 - fluxo total = 729;
 - fluxo uniforme = 0;
 - tempo de cruzamento (fluxo de entrada) = 18;
 - tempo de cruzamento (fluxo de saída) = 20;

Referências Bibliográficas

- [1] (1984). *Manual de Semáforos*. Brasília: DENATRAN.
- [2] (1990). *Traffic Network Study Tool - TRANSYT 7F - United States Version*. Mc Trans Center.
- [3] A, J. M. (1963). Setting for fixed-cycle traffic signals. *Operational Research Quarterly*, 14(4):373–386.
- [4] Akcelik, R. (1988). The highway capacity manual delay formula for signalized intersections. *ITE Journal*, 58(3):23–27.
- [5] Board, T. R. (1998). *Highway Capacity Manual 2000*. National Research Council, Washington D.C., special report 209 Edition.
- [6] Board, T. R. (2000). *Highway Capacity Manual 2000*. National Research Council, Washington D.C., special report 209 Edition.
- [7] Boillot, F. (1994). Evaluation of the real time urban traffic control algorithm CRONOS: first phase. pp 585–590, Tianjin, China. in Proc. 7th IFAC/IFORS Symposium on Transportation.
- [8] Cervantes, S. G. S. (2005). Um algoritmo descentralizado para controle de tráfego urbano em tempo real. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- [9] Farges, J. L., Kamdem, I., e Lesort, J. B. (1991). Realization and test of a prototype for real time urban traffic control. Tech report, Drive Project V1022.
- [10] Farges, J. L., Khoudour, L., e Lesort, J. B. (1990). Prodyn: on site evaluation. pp 62–66, Washington, DC. in Proc. Road Traffic Control, 3th International Conference.
- [11] Garbacz, R. E. (2002). Adaptive signal control: what to expect. Washington, DC. 12th Annual Meeting of the Intelligent Transportation Society of America.
- [12] Gartner, N. H. (2001). Optimized policies for adaptive control. Washington D.C. Workshop on Adaptive Traffic Signal Control Systems Transportation Research Board.
- [13] Gerlough, D. L. e Huber, M. J. (1975). Traffic flow theory. Tech Report Special Report 165, Transportation Research Board, Washington, D. C.

- [14] Gobbo, A. F. (2005). Proposta de aplicação de sistemas de inferência neuro-fuzzy para otimização de tráfego. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR.
- [15] Hounsell, N. B. e McDonald, M. (2001). Urban network traffic control. *Institution of Mechanical Engineers*, 215:325–334.
- [16] Hunt, P. B., Robertson, D. L., e Bretherton, R. D. (1982). The scoot on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Eng. Control*, 23:190–192.
- [17] Kang, Y. (2000). *Delay, stop and queue estimation for uniform and random traffic arrivals at fixed-time signalized intersections*. Phd Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [18] Lee, S. H. (2005). *Introdução ao Projeto Geométrico de Rodovias*. Editora da UFSC, Florianópolis.
- [19] Little, J. D. C. (1966). The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming. *Operations Research*, 14:568–594.
- [20] Little, J. D. C., Kelson, M. D., e Gartner, N. H. (1981). MAXBAND: A program for setting signals on arteries and triangular networks. *Transportation Research Record*, 795:40–46.
- [21] Loureiro, C. F., Gomes, M. J. T. L., e Leandro, C. H. P. (2005). Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de interseções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real.
- [22] Lowrie, P. (1982). The sydney co-ordinated adaptive traffic system - principles, methodology, algorithms. volume 82, pp 67–70. IEE International Conference Road Traffic Signalling.
- [23] Martin, P. T. e Hockaday, S. L. M. (1995). Scoot - an update. pp 44–48. ITE Journal.
- [24] Ming, S. H. (1997). Nt 201 - uma breve descrição do sistema scoot. Notas Técnicas NT 201, Companhia de Engenharia de Tráfego - CET.
- [25] Mirchandani, P. e Head, L. (2001). Rhodes: A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research – Part C*, 8:105–114.
- [26] Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., e Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12):2043–2067.
- [27] Porche, I., Sampath, M., Sengupta, R., Chen, Y. L., e Lafortune, S. (1996). A decentralized scheme for real-time optimization of traffic signals. pp 582–589. IEEE International Conference on Control Applications.
- [28] R., W., R., B., R., G., e J., H. (1985). *Traffic Control Systems Handbook*. U.S. Department of Transportation, Washington D.C., special report - fhwa-ip-85-11 Edition.

- [29] Robertson, D. I. (1968). TRANSYT: A traffic network study tool. Tech report, Road Research Laboratory, Crowthorne, England.
- [30] Robertson, D. I. e Bretherton, R. D. (1991). Optimization networks of traffic signals in real-time: the SCOOT method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40:11–15.
- [31] Robertson, D. I. e Hunt, P. (82). A method of estimating the benefits of coordinating signals by transyt and scoot. *Traffic Engineering and Control*, 23(11):527–531.
- [32] Roupail, N., Tarko, A., e Li, J. (1992). Traffic flow theory and characteristics. Tech report.
- [33] Webster, F. V. (1969). Traffic signal settings. Tech Report 39, Department of Scientific and Industrial Research.
- [34] Williams, H. P. (1999). *Model Building in Mathematical Programming*. John Wiley.
- [35] Wilshire, R., Black, R., Grochoske, R., e Hogonbothan, J. (1985). *Traffic Control System Handbook*. PAWA-Winkelmann and Associates, Inc, 12660 Coit Road, Dallas, TX 75251, institute of transportation engineers Edition.
- [36] Wolsey, L. A. (1998). *Integer Programming*. John Wiley & Sons.