

JULIANI CHICO PIAI

**Estudo Comparativo de Técnicas de Controle
Semafórico**

LONDRINA

2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Estudo Comparativo de Técnicas de Controle
Semafórico

Dissertação de mestrado submetido à
Universidade Estadual de Londrina
como parte dos requisitos para a obtenção
do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

JULIANI CHICO PIAI

Londrina, Setembro de 2009.

Estudo Comparativo de Técnicas de Controle Semafórico

Juliani Chico Piai

‘Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de mestre em engenharia elétrica e aprovado em sua forma final pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina.’

Profa. Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes
Orientador

Prof. Dr. José Alexandre de França
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Ph.D. José Reynaldo Anselmo Setti

Dr. José Alexandre de França

À minha família, o bem mais precioso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, o único que está acima da nossa ignorância e não me deixou sozinha em mais esta caminhada.

Aos meus pais, Isidro e Conceição, que apesar de não participarem deste momento tão importante, me deram todas as condições para que ele acontecesse.

Aos meus irmãos Mauro, Roberto, Sérgio e Rosely, pelo companheirismo e por fortalecerem em mim os exemplos deixados por nossos pais: ousadia, coragem, trabalho, honestidade, força para viver e fé em Deus.

A minha tia Maria, por todo o cuidado e carinho.

A minha professora orientadora, Dra. Silvia Cervantes , pelo auxílio, disponibilidade de tempo e material e principalmente por ter se tornado muito importante em minha vida.

Ao IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina-PR) pelo fornecimento de dados para a pesquisa.

A todos, que não são poucos, que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho se tornasse uma realidade.

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

Estudo Comparativo de Técnicas de Controle Semafórico

Juliani Chico Piai

SETEMBRO/2009

Orientador: Profa. Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Palavras-chave: Controle semafórico, Engenharia de Tráfego, Otimização

Os problemas de congestionamento, que aumentam o tempo em que usuários ficam parados em seus veículos ou transportes coletivos, vem tomando dimensões inaceitáveis na atualidade. Métodos de otimização que apresentam temporizações semafóricas que minimizem as paradas e atrasos são uma solução para sistemas ainda não saturados. Este trabalho apresenta a evolução de algoritmos de controle de tráfego urbano desde o controle semafórico em tempo fixo, ao controle em tempo real, percorrendo quatro etapas de desenvolvimento.

Na primeira delas, desenvolveu-se um modelo de tráfego comum aos três algoritmos e validado através da comparação de resultados com a estratégia TRANSYT/10, já consagrada comercialmente. Depois, foi desenvolvido o modelo de otimização para o algoritmo em tempo fixo, ATEFI, que otimiza as variáveis de tempo de verde, defasagem e ciclo, baseado na estratégia TRANSYT/10. O algoritmo é *offline*, ou seja, depende do conhecimento da demanda veicular total do sistema. Posteriormente, um algoritmo semi-atuado baseado no SCOOT, ATESA, que apresenta as mesmas otimizações do modelo anterior, no entanto, efetua os cálculos de maneira diferenciada foi desenvolvido. A demanda, neste caso, é verificada em tempo real através de detectores veiculares. Finalmente, um algoritmo em tempo real, ATERE, com minimização de atraso em resposta a variação da demanda detectada desenvolvido com base no PRODYN.

Além disso, também se compara o desempenho dos três algoritmos através do atraso verificado para uma sub-rede da malha viária central da cidade de Londrina-Paraná, Brasil. O trabalho tem como objetivo a criação de uma estratégia de controle que utilize os três algoritmos desenvolvidos em uma central de controle de tráfego. Dessa forma, será possível a aplicação dos algoritmos em acordo com as características das áreas controladas.

ABSTRACT

The congestion problems that increase the time the users are at a stand inside their vehicles or public transportations, are taking unacceptable dimensions nowadays. Methods to optimize that present cost times of the traffic lights that minimize the stops and delays are a solution for systems not yet saturated. This work presents the evolution of algorithms which controls the urban traffic since the traffic light control in fixed-time, to the real-time control, covering four development stages.

The first of them, the development of a model of common traffic to the three algorithms and validated through the comparison of results with the strategy TRANSYT/10, already commercially consecrated. After that, the development of the optimizing model to the algorithm in fixed-time, ATEFI, which optimizes the time variables of the green light, offset and cycle, based in strategy TRANSYT/10. The algorithm is offline, it means it depends on the knowledge of the total vehicular demand of the system. Later, an algorithm semi actuated based in SCOOT, ATESA, that presents the same optimizations of the previous model, however, effects the calculations in differentiated way. The demand, in this case, is verified in real-time through the vehicle detections. Finally, an algorithm in real-time, ATERE, with the minimization of delay in reply to the variation of the detected demand developed based in PRODYN.

Besides, it also compared with the performance of the three algorithms through the delay verified for a subnet of the central road mesh of the city of Londrina, Parana, Brazil. The thesis has the objective the creation of a control strategy that used the three algorithms developed in a central office of traffic control. In this way, it'll be possible the adequacy of the algorithm to the characteristics of the controlled areas.

Conteúdo

Lista de Figuras	ix
Lista de Símbolos e Abreviações	x
1 Introdução	1
1.1 Conceitos Básicos	2
1.1.1 Redes Viárias	2
1.1.2 Fluxos Veiculares	3
1.1.3 Elementos de Controle de Tráfego	4
1.2 Ferramentas de Análise	6
1.2.1 Modelo de Tráfego	6
1.2.2 Modelo de Otimização e Algoritmos de Busca	7
1.3 Metodologias de Controle de Tráfego	10
1.3.1 Tempo Fixo	10
1.3.2 Semi-Atuado	13
1.3.3 Completamente Atuado (Tempo Real)	16
1.4 Modelo de Tráfego	18
1.5 ATEFI	20
1.5.1 Modelo de Otimização	21
1.6 ATESA - Algoritmo de Temporização Semi-Atuada	25
1.6.1 Modelo de otimização	25
1.7 ATERE - Algoritmo em Tempo Real	28
1.7.1 Modelo de Otimização	28
Referências	31

2	Objetivos	34
2.1	Geral	34
2.2	Específicos	34
	Artigo para Publicação	35
3	Algoritmos para Controle de Tráfego Urbano - Estudo Comparativo	36
3.1	Introdução	37
3.2	Modelo de Tráfego	38
3.3	Modelo de Otimização	40
3.3.1	ATEFI	40
3.3.2	ATESA	41
3.3.3	ATERE	43
3.4	Resultados	45
3.4.1	Validação do modelo de tráfego	46
3.4.2	Avaliação de desempenho	48
3.5	Conclusões	49
	Referências	49
4	Conclusão	51

Lista de Figuras

1.1	Interseção Isolada	3
1.2	Diagrama de Tempos	5
1.3	Horizonte deslizante (Adaptada de (?))	10
1.4	Modelo do TRANSYT	11
1.5	Perfil IN-profile	12
1.6	Perfil OUT-Profile	12
1.7	Perfil GO-Profile	13
1.8	Funcionamento do SCOOT	15
1.9	PRODYN: Coordenação Implícita	18
1.10	Seções de uma via.	19
1.11	Indicação semafórica	21
1.12	Rede de Tráfego	22
1.13	Função a ser otimizada por Hill Climbing	23
1.14	Árvore de Decisões	29
3.1	Seções de uma via.	39
3.2	Árvore de Decisão.	44
3.3	Malha viária.	45
3.4	Comparação entre modelos via 1.	46
3.5	Comparação entre modelos via 2.	46
3.6	Comparação entre modelos via 3.	47
3.7	Comparação entre modelos via 4.	47
3.8	Comparação entre modelos via 5.	47
3.9	Comparação entre modelos via 6.	48

Lista de Símbolos e Abreviações

<i>ATEFI</i>	Algoritmo em Tempo Fixo.
<i>ATERE</i>	Algoritmo em Tempo Real.
<i>ATESA</i>	Algoritmo de Temporização Semi-Atuada.
<i>C</i>	Tempo de Ciclo.
<i>c</i>	Controle de Sinal na via.
<i>e</i>	Indicação Semafórica Vigente.
<i>g</i>	Tempo de Verde Efetivo.
<i>i</i>	Interseção.
<i>ID</i>	Índice de Desempenho.
<i>k</i>	Tempo de Verde.
<i>l</i>	Vias.
<i>LPU</i>	<i>Link Profile Unit</i> .
<i>m</i>	Fila.
<i>p.c.u.</i>	<i>Passenger-Car Units</i> .
<i>PFC</i>	Perfil de Fluxo Cíclico.
<i>q</i>	Fluxo de saturação.
<i>r</i>	Tempo de Vermelho.
<i>s</i>	Taxa de descarga de veículos.
<i>T</i>	Tempo Total de Simulação.
<i>t</i>	Tempo.
<i>t_s</i>	Tempo amostral.
<i>UTC</i>	<i>Urban Traffic Control</i> .
<i>v</i>	Velocidade.
<i>w</i>	Períodos decorrido do estágio vigente.

x Grau de Saturação.
 y Tempo de Amarelo.
 z Entada de fluxo.

Introdução

Ruas e avenidas são o meio físico de circulação de veículos em uma cidade. Normalmente, em um cruzamento entre duas ou mais vias, existem veículos cujos movimentos não podem ser realizados simultaneamente, pois são conflitantes entre si. Portanto, é necessário estabelecer alguma norma de prioridade, a fim de aumentar a fluidez veicular no cruzamento e reduzir os riscos de acidentes, tanto entre veículos como veículos-pedestres. Nas vias que apresentam volumes elevados de tráfego são instalados semáforos. O semáforo é um dispositivo de controle de tráfego que, através de indicações luminosas transmitidas para veículos e pedestres, alterna o direito de passagem. O foco do controle de tráfego está em garantir que este dispositivo atue de maneira satisfatória, reduzindo os atrasos, paradas e garantindo maior fluidez e segurança ao tráfego urbano. A sociedade espera das autoridades responsáveis pelo gerenciamento das malhas viárias, a diminuição do tempo perdido no trânsito e conseqüentemente, do excesso de consumo de combustíveis e emissão de poluentes, que afetam negativamente o meio ambiente.

O desempenho de uma rede de tráfego pode ser avaliado pelo critério de atraso veicular e a garantia de segurança aos usuários das vias. Outra forma de analisá-lo é através da verificação de coordenação entre as interseções da rede e a descarga de filas. A coordenação é obtida ao garantir que o último veículo da fila (formada durante o tempo de vermelho), é liberado da via a montante da interseção (durante o tempo de verde) e atingirá a linha de parada enquanto a indicação semafórica, na via a jusante, permanecer verde. Através de uma boa coordenação busca-se reduzir o número de paradas e induzir fluxo contínuo na via arterial. Já o aspecto da descarga de filas é garantido quando a duração do tempo de verde é suficiente para, no mínimo, descarregar a fila formada durante o tempo de vermelho da via, sendo este o caso de fluxo não saturado, ou no limite da saturação. Quando o tempo de verde é suficiente para descarregar também o pelotão que chega da via a montante, ocorre o caso de fluxo não saturado e quando o tempo de verde não é suficiente para descarregar a fila formada no tempo de vermelho do mesmo ciclo, tem-se o caso de fluxo supersaturado.

Inicialmente é analisado o modelo de tráfego desenvolvido. Este é aplicado aos três algoritmos avaliados no trabalho: ATEFI (Algoritmo em Tempo Fixo), ATESA (Algoritmo

de Temporização Semi Atuada) e ATERE (Algoritmo em Tempo Real). O primeiro deles se caracteriza por apresentar planos de tempos semafóricos fixos. Nele são aplicadas otimizações de tempo de verde, offset e tempo de ciclo. O ATESA trabalha com demanda detectada em tempo real. As mesmas variáveis do ATEFI são otimizadas, no entanto, calculadas de forma diferenciada. O ATERE é um algoritmo de controle de tráfego em tempo real, que busca minimizar o atraso de acordo com a demanda veicular detectada.

A escolha do algoritmo a ser aplicado depende da disponibilidade de infraestrutura de comunicação (com ou sem fio), características do fluxo de tráfego no local, espaçamento da interseção, colocação e manutenção de detectores, entre outros. O trabalho tem como objetivo a criação de uma estratégia de controle que utilize os três algoritmos desenvolvidos em uma central de controle de tráfego, adequando-os de acordo com as necessidades das áreas controladas.

1.1 Conceitos Básicos

Para que ocorra uma compreensão adequada do trabalho, serão apresentados alguns conceitos básicos de tráfego veicular urbano, bem como algumas ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste.

1.1.1 Redes Viárias

As redes viárias são compostas pelos seguintes elementos, Figura 1.1 (1):

1. **faixa de trânsito** - é o espaço determinado para o fluxo de veículos em um sentido único de fluxo;
2. **pista** - é um conjunto de faixas de trânsito;
3. **via** - é um conjunto de pistas que pode permitir sentido duplo de fluxo;
4. **via externa** - é a via que recebe fluxo veicular externo da região em análise;
5. **via interna** - é a via que recebe fluxo veicular já circulante na região em análise. Existem duas seções notáveis: uma seção a montante, de entrada da via, e outra a jusante, coincidente com a faixa de retenção;
6. **interseção** - é o local onde duas ou mais vias se cruzam, criando um conflito entre os sentidos de circulação de veículos;
7. **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 sequencial 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.

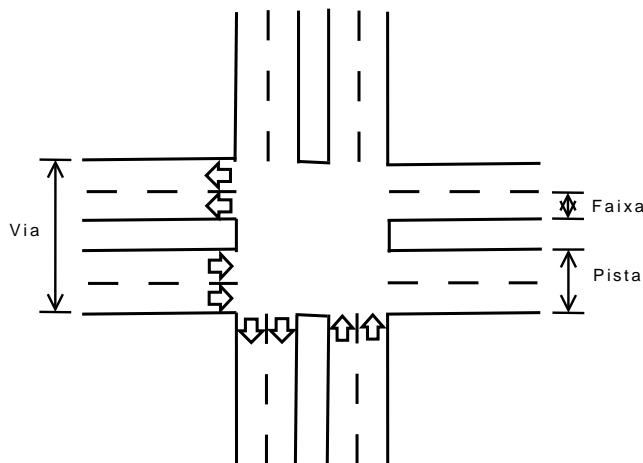


Figura 1.1 – Interseção Isolada

1.1.2 Fluxos Veiculares

O fluxo de veículos nas redes viárias pode ser caracterizado pelos conceitos definidos a seguir, que podem ser encontrados em (1), (2), (3):

1. **velocidade (u)** - expressa a razão de movimento e é usualmente definida como a distância percorrida por unidade de tempo;
2. **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).

$$q = \frac{N}{T}, \quad (1.1)$$

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

3. **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);
4. **p.c.u.** - é uma unidade que dividida pelo tempo (hora) representa a unidade do fluxo de veículos. A unidade *p.c.u.* é muito utilizada em tráfego e significa *passenger-car units*. Um *p.c.u.* é equivalente a um veículo leve de passeio;

5. **volume** - é o número de veículos que passa por uma dada seção de uma via em um intervalo de tempo determinado;
6. **pelotão** - um grupo de veículos que atravessa uma via, sem que ocorra dispersão;
7. **fila** - é um grupo de veículos estacionário na linha de parada de uma via;
8. **fluxo de saturação** - é a máxima taxa segundo a qual os veículos podem passar por uma dada aproximação se o sinal verde estivesse disponível durante uma hora completa;
9. **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;
10. **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;
11. **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;
12. **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.

1.1.3 Elementos de Controle de Tráfego

Quando existem intersecções semaforizadas, seus tempos semafóricos devem ser ajustados por algum tipo de controle. As variáveis que permitem este controle são (4):

1. **tempo de vermelho (r)** - é o tempo durante o qual a luz vermelha do semáforo permanece acesa indicando que os veículos não têm permissão para cruzar a interseção;
2. **tempo de verde (k)** - é o tempo durante o qual a luz verde do semáforo permanece acesa indicando permissão à passagem de veículos;
3. **tempo de amarelo (y)** - 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;

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

$$g = k + y - o, \tag{1.2}$$

6. **ciclo** - é a repetição de uma série básica de combinações semaforicas para uma interseção. Sua duração é chamada de tempo de ciclo. Um exemplo pode ser verificado na Figura 1.11;
7. **tempo de ciclo (C)** - A Equação 1.3 aproxima o comprimento de ciclo de menor atraso para a interseção (5):

$$c_0 = \frac{1,5L + 5}{1 - Y_1 - Y_2 \dots - Y_n}, \tag{1.3}$$

Sendo: c_0 - comprimento de ciclo ótimo em segundos; L - o tempo perdido por ciclo, geralmente a soma do total de amarelo e o total de vermelho apurados por ciclo, em segundos; Y_i - volume dividido pelo fluxo de saturação para aproximações críticas na fase i ; n - Subscrito para cada fase.

8. **fase** - cada conjunto de movimentos comandados por uma mesma sequência de indicações luminosas nos estágios do ciclo, Figura 1.2;
9. **estágio** - parte de um ciclo durante o qual um grupo de movimentos têm permissão de passagem, Figura 1.2.

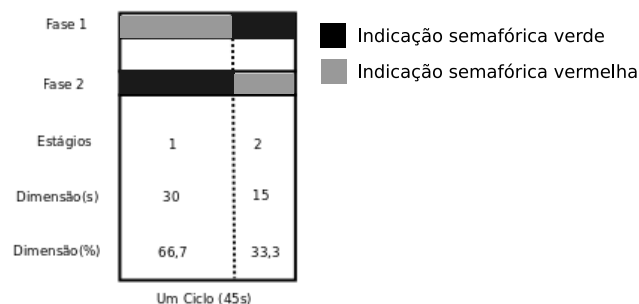


Figura 1.2 – Diagrama de Tempos

10. **entreverde** - é o intervalo de tempo entre estágios sucessivos (no qual ocorre a alteração do conjunto de movimentos autorizados e bloqueados);
11. **split ou porcentagem de verde** - é a forma como o ciclo está dividido entre os estágios; mais precisamente, é o conjunto de frações do ciclo atribuídas a cada estágio;

12. **offset ou defasagem** - é o instante do início do estágio um 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.
13. **Tempo mínimo** - é o menor tempo de verde que deve ser considerado na interseção para garantir a travessia de veículos.
14. **UTC (*Urban Traffic Control*)** - é o termo usado para descrever a técnica de coordenação de sinais de tráfego, normalmente através de uma central computacional.
15. **Banda de Passagem** - O espaço compreendido entre duas retas de mesma velocidade (linhas paralelas) e que constituem um movimento progressivo.

1.2 Ferramentas de Análise

Muitos estudos foram realizados para o auxílio na análise de atuação e coordenação dos sinais de tráfego nas vias: CORSIM (6), Synchro (7), PASSER (5), TRANSYT (8), SCATS (9), SCOOT (10), OPAC (11), UTOPIA (12), RHODES (13), ALLONS-D (14), PROLYN (15), entre outros . Todas estas estratégias são baseadas na abstração da realidade e compostas por um modelo de tráfego e um modelo de otimização. Uma descrição breve destes conceitos se torna necessária para melhor compreensão do trabalho (5).

1.2.1 Modelo de Tráfego

Um modelo de tráfego deve descrever o comportamento da dinâmica dos veículos nas vias da área em estudo. Ele deve conter todas as características físicas das vias e uma descrição completa do plano de controle de tráfego como entrada. Então, ele avalia ou simula o cenário descrito e a eficácia das medidas de saída (16). Tipicamente estas medidas incluem: atraso médio ou total, número de paradas, consumo de combustível, eficiência da largura de banda, filas médias ou máximas, etc. Muitos modelos fornecem uma estimativa de diversas, senão todas, as medidas de saída. Existem três tipos comuns de modelo de tráfego: microscópico, mesoscópico e macroscópico.

Modelo de Tráfego Microscópico

O modelo de tráfego microscópico fornece muitos detalhes pela simulação do comportamento (aceleração, desaceleração, carro seguinte, etc.) dos veículos individualmente no fluxo de tráfego (5). No geral, esses modelos são estocásticos por natureza e confia a um gerador de números aleatórios que usa um valor semente para gerar valores de vários parâmetros durante a simulação. Para obter outra amostra, o usuário deve mudar o valor da semente e rodar

novamente a simulação. Simular com diferentes sementes é equivalente a coletar amostras randômicas de dados, similar a coletar dados de um período de pico ao longo de vários dias consecutivos. Devido ao nível de detalhes simulados, este modelo requer o máximo número de dados e grande esforço computacional.

Modelo de Tráfego Mesoscópico

Este modelo simula o fluxo de tráfego em específicos passos de tempo, e são sempre determinísticos. O passo de tempo pode ser de 1,2 ou mais segundos. Para cada um destes, o modelo estima o fluxo de tráfego entrando em uma via, viajando a jusante, parando devido à luz vermelha, e movimentando novamente quando a luz se torna verde. Alguns desses modelos também contam com a dispersão de pelotão, como os veículos viajam de um ponto a outro a jusante no espaço. O modelo mesoscópico pode ser classificado como baseado em via ou baseado em tempo. O modelo baseado em via simula o fluxo de tráfego em uma via em um tempo para todos os passos de um ciclo. Este modelo trata a fila de veículos no sinal como uma pilha ascendente. Como resultado, todos os veículos chegando durante o vermelho vão até a linha de parada e se juntam à fila vertical. O modelo baseado em via pode permitir mais veículos na pilha da fila do que a capacidade de armazenamento da via. Então, este modelo não é adequado para condições de congestionamento ou para vias curtas onde o tempo sub-ótimo pode causar filas desde o sinal anterior. O modelo baseado em tempo, por outro lado, simula o fluxo de tráfego em todas as vias para cada passo de tempo. Este modelo é utilizado nos algoritmos desenvolvidos neste trabalho e pode representar fielmente o comportamento das filas e a interação do fluxo de tráfego entre vias adjacentes. Por outro lado, ele é mais intenso do ponto de vista computacional. Além disso, a precisão desse modelo pode depender do número de ciclos simulados.

Modelo de Tráfego Macroscópico

Modelos nesta categoria simulam o comportamento ciclo por ciclo dos pelotões no tráfego de cada via no sistema e é determinístico por natureza. Este modelo pode ou não contar a dispersão do pelotão. Ele trata a fila de veículos como pilha ascendente. Então, ele é exato somente para condições de fluxo não-saturadas. Por causa de sua natureza simplista, o modelo macroscópico é mais eficiente do ponto de vista computacional.

1.2.2 Modelo de Otimização e Algoritmos de Busca

Como mencionado anteriormente, o modelo de tráfego simula as condições de tráfego e controle. Em outras palavras, ele é capaz de avaliar o desempenho das vias. Os modelos de otimização e algoritmos de busca geram o cenário, comparando sua forma ou valor da função objetivo (atraso, eficiência de banda de passagem, etc.) obtido pelo uso da simulação

ou modelo, e seleciona o melhor para as condições pré-determinadas. Por exemplo, se a minimização do atraso é o objetivo desejado, o primeiro valor será o atraso gerado aos motoristas para um cenário específico. Tal modelo de otimização irá avaliar o valor do atraso para cada alternativa de temporização e selecionará o que resultar na menor contagem de atraso. Algoritmos de busca podem ser simples ou extremamente sofisticados. Alguns algoritmos comuns ao controle de tráfego serão abordados.

Algoritmo de Busca Exaustiva

Como o nome implica, este algoritmo calcula e compara os valores selecionados para todos os possíveis cenários de tempo semafórico (17). Deve-se notar que podem existir milhões de combinações de parâmetros de tempos semafóricos, dependendo do tamanho da instalação, e muitas variáveis são otimizadas simultaneamente. Então, a busca exaustiva pode requerer horas de computação. Exceto que o modelo seja projetado para pequenas instalações, o número completo de cenários possíveis frequentemente requer o uso de uma estratégia dividir para conquistar. Por exemplo, o tempo computacional pode ser drasticamente reduzido por uma otimização em etapas em vez de todas as variáveis simultaneamente e/ou pelo uso de uma simples análise ou modelo de simulação. Tal estratégia melhora a eficiência computacional pelo sacrifício da precisão. A característica positiva dos algoritmos exaustivos é que as informações completas são avaliadas para cada cenário analisado. A maioria dos algoritmos de otimização usam alguns níveis de busca exaustiva combinada com outros algoritmos de busca.

Algoritmo Hill-Climbing

O algoritmo Hill-Climbing começa com base em um cenário especificado pelo usuário, selecionado pelo programa usando critérios fixos, ou seleção randômica (18). Então, ele seleciona a variável a ser otimizada (defasagem, comprimento de ciclo, etc.) e cria dois cenários adicionais para esta variável, um para incremento e outro para decremento do valor. Inicialmente, o valor da variável selecionada é incrementado e decrementado por um valor específico chamado de tamanho de passo. Na sequência deste, o algoritmo usa o simulador de tráfego para calcular o valor para cada um dos dois cenários e os compara com o cenário base. Estas avaliações identificam o melhor dos dois cenários e, conseqüentemente, a direção da busca adicional. Por exemplo, se incrementar o valor da variável selecionada resulta em um melhor valor, o algoritmo de busca marcará este novo cenário como o melhor atual e continuará procurando na direção de incrementar valores a variável. Na próxima iteração, o algoritmo de busca gerará um novo cenário pelo incremento ou decremento no valor da variável na direção de busca selecionada, calculando o novo valor, e comparando-o com o melhor valor atual. O algoritmo continua desta maneira até cessar com o valor para o novo cenário melhor que o atual. O método Hill-Climbing garante soluções ótimas somente quando a função a

ser otimizada é *unimodal* (tem um pico ou vale). Para funções *multi-modal*, o método pode terminar com uma solução sub-ótima dependendo de quão bom o cenário base é. Muitas implementações do algoritmo Hill-Climbing usam técnicas sofisticadas, como um tamanho de passo da variável para acelerar o processo de busca.

Horizonte Deslizante

O esquema de horizonte deslizante para o controle de tráfego de uma interseção isolada escolhe uma estratégia a cada tempo t que minimize o atraso total durante um período de tempo finito (horizonte) (11). Conforme o tempo passa, o horizonte caminha (deslizante). A cada período em intervalos de tempo muito próximos, um teste pode ou não mudar o sinal. O cálculo do atraso atual pode ser lento se o horizonte for formado por diversos ciclos mas, para a maioria dos períodos, o sinal não será alterado se ele estiver servindo o tráfego com maior volume de veículos.

O conceito de horizonte deslizante permite ao modelo computar tempos semafóricos usando informações do tráfego facilmente obtidas de detectores posicionados no início do tramo. Um estágio constituído de k intervalos será chamado de horizonte de projeção. Cada horizonte de projeção é dividido em uma porção chamada de cabeça e outra de cauda. Uma pode obter os dados exatos do fluxo de chegada para os próximos r intervalos, a cabeça do estágio, dos detectores posicionados no início da via. Para os $(k - r)$ intervalos restantes, a cauda do estágio, os dados de fluxo são estimados pelo modelo ou dos dados coletados durante horizontes de projeção anteriores. Estas informações de tráfego são usadas para obter a melhor sequência de chaveamento dos semáforos para o estágio inteiro, mas somente decisões para a porção da cabeça são implementadas. O horizonte de projeção então desliza pelas r unidades para criar um novo estágio e todo o processo se repete, Figura 1.3.

O comprimento da porção da cabeça, r , é escolhido para ser o tempo de viagem de fluxo livre dos detectores até a linha de parada. Os detectores devem ser posicionados de 120 a 183 metros antes da linha de parada, assim o valor de r será 2 ou 3. Deve haver um detector em cada linha. Três formas do modelo de cauda podem ser desenvolvidas. Para um modelo fixo, um valor constante e igual a média de fluxo para o período de controle é usado para cada intervalo na porção da cauda do estágio. Para um modelo estatístico, valores diferentes para cada intervalo do estágio são utilizados. Os valores são baseados no valor médio para este intervalo com um padrão cíclico de chegadas sobre o período de controle. Para um modelo dinâmico, cada intervalo no estágio contém o valor vindo das chegadas atuais durante o estágio anterior exponencialmente amortecido contra o intervalo correspondente no estágio anterior.

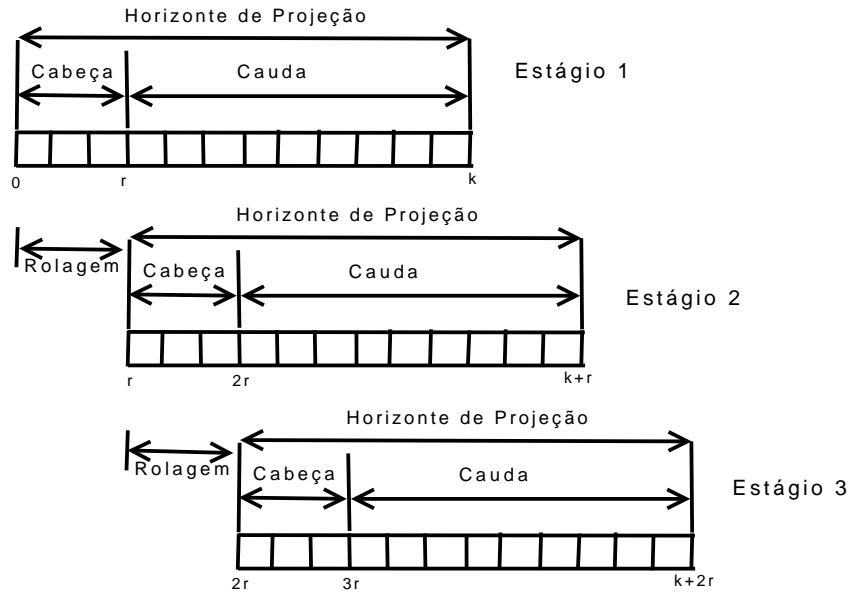


Figura 1.3 – Horizonte deslizante (Adaptada de (11))

1.3 Metodologias de Controle de Tráfego

Os controles de tráfego modernos são capazes de operar em um dos três modos: fixo, semi-atuado ou completamente atuado. A escolha do modelo depende de várias considerações, incluindo disponibilidade de infraestrutura de comunicação (com ou sem fio), características do fluxo de tráfego no local, espaçamento da interseção, colocação e manutenção de detectores, entre outros. Serão discutidos suas descrições, condições para aplicação, e exemplos de cada modo de controle.

1.3.1 Tempo Fixo

Como o nome implica, este tipo de controle é fixo em termos de comprimento de ciclo e divisão de fase (5). Uma vez programado, as mesmas ordens e durações de indicação de fase ocorrerão na interseção até que as configurações do controlador sejam reprogramadas manualmente, ou outro ajuste de configuração de duração fixa seja selecionado pelo horário do dia ou dia de semana/mês/ano. Este modo não é responsivo ao tráfego (não usa detectores), mas pode ser usado em sistemas coordenados junto a arteriais ou em sistemas de rede. Um sistema comum de aplicação de controle em tempo fixo é um sistema fechado que não usa detector. Operações em tempo fixo tendem a ser mais efetivas onde há um pequeno ou nenhum crescimento do tráfego e os padrões do tráfego são regulares e previsíveis. Pequenas e médias cidades são locais típicos para a operação efetiva de controle em tempo fixo. Para este trabalho, foi desenvolvido o algoritmo ATEFI (Algoritmo em Tempo Fixo), baseado na estratégia consagrada TRANSYT.

TRANSYT

O TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*) é um programa *offline* para calcular tempos semafóricos otimizados em uma rede de tráfego. É um modelo mesoscópico e determinístico, e tem sido desenvolvido e testado por algumas décadas ganhando aceitação da comunidade de usuários.

Desde a primeira estratégia desenvolvida em 1967, na Inglaterra (19), várias versões têm sido produzidas. A mais recente delas é o TRANSYT/13 que entra no mercado trazendo, entre outras inovações, um novo modelo de célula de transmissão, que apresenta a figura completa da localização de todo o tráfego na rede a qualquer instante do ciclo (20).

A estratégia possui dois elementos centrais, como pode ser visto na Figura 1.4: o modelo de tráfego e a otimização do sinal.

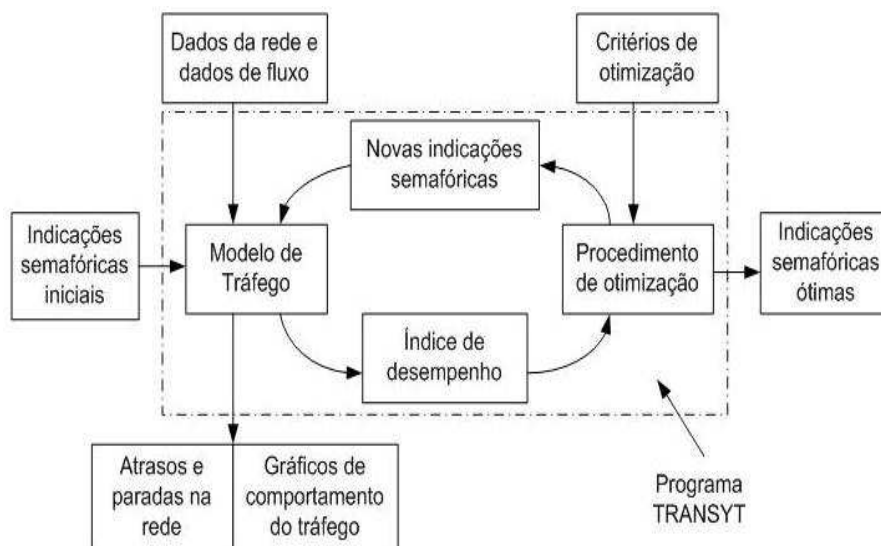


Figura 1.4 – Modelo do TRANSYT

Os dados de entrada do modelo de tráfego são características da rede, como: demanda fixa de veículos, número de interseções, número de vias, etc; e as indicações semafóricas iniciais. O modelo prediz o valor do índice de Desempenho (ID) para a rede, para qualquer plano de tempo fixo e ajusta a média de fluxo veicular. O ID é o custo total do congestionamento de tráfego e é sempre a combinação média do valor total do atraso com o número de paradas (21). Através do ID avalia-se o comportamento do tráfego (19).

Sendo um modelo *offline*, nenhuma detecção de veículos é requerida para implementar o TRANSYT. Entretanto, o fluxo de tráfego varia na rede entre dias e períodos do dia, então é usual desenvolver e programar uma linha de planos para fornecer esta variabilidade. Desta forma, estes planos podem ser usados como suplemento ou para substituir o plano selecionado em determinado momento do dia (22).

O fluxo de tráfego por passo é representado em histogramas chamados de perfis de fluxo

cíclicos (PFC). Estes perfis podem ser obtidos como uma saída gráfica opcional para o TRANSYT e são úteis na validação do modelo.

Existem três tipos de perfis: IN-Profile, OUT-Profile e GO-Profile, onde um indica sinal verde e zero representa o sinal vermelho. O primeiro, Figura 1.5, é o padrão de tráfego que chegaria a linha de parada no fim da via a jusante se o tráfego não fosse impedido pelo semáforo na linha de parada. O segundo, Figura 1.6, é o padrão de tráfego que deixa a via. O último, Figura 1.7, representa o padrão de tráfego que deixaria a linha de parada se existisse tráfego suficiente para saturar o verde.

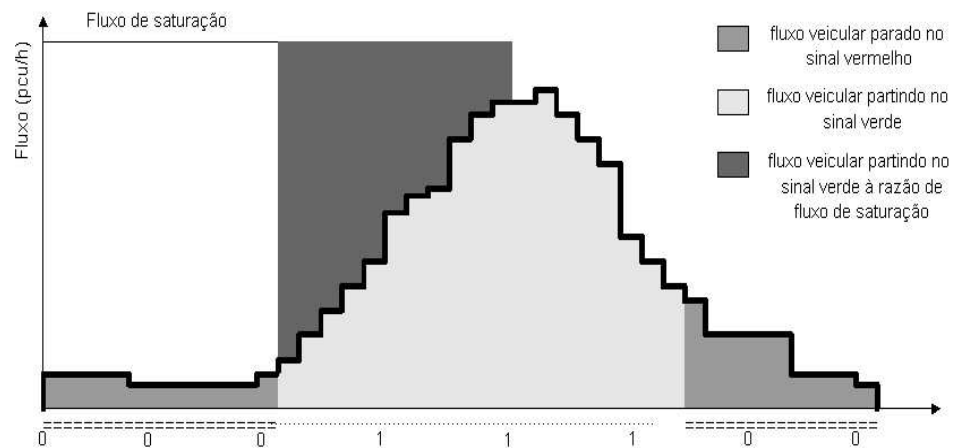


Figura 1.5 – Perfil IN-profile

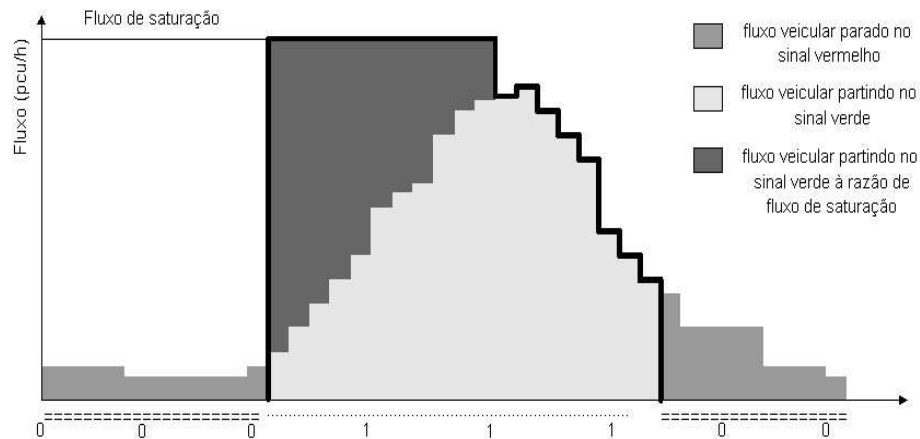


Figura 1.6 – Perfil OUT-Profile

O processo de otimização busca ajustes de tempo na rede que minimizem filas e atrasos. Ele é baseado na heurística *Hill Climbing*, pois os dados de demanda veicular são conhecidos antecipadamente (23). O otimizador modifica os tempos de *offset* que afetam a coordenação entre semáforos, e a duração do tempo individual do estágio de verde de cada junção (8).

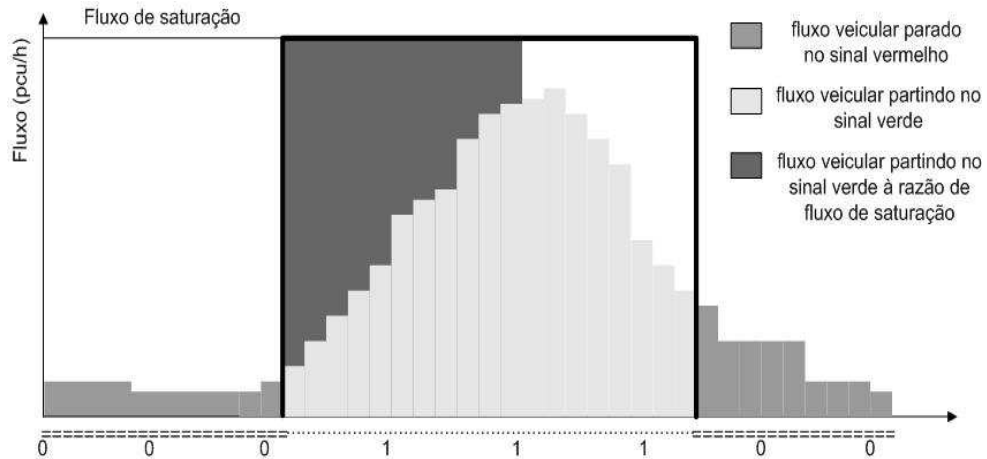


Figura 1.7 – Perfil GO-Profile

1.3.2 Semi-Atuado

A operação Semi-Atuado ou Atuado Coordenadamente usa detectores em fases não coordenadas para oferecer um uso mais flexível do tempo de verde (24). Um ciclo de comprimento fixo continua em vigor e o tempo de cada fase é que pode variar. Contudo, a fase de conversão à esquerda da via principal e as fases de conversão à esquerda e siga da via de cruzamento podem ser ignoradas, encurtadas ou alongadas em comparação com o controle em tempo fixo, dependendo da demanda. Infelizmente, a adição deste grau de liberdade na gestão do tempo de verde é obtido pelo uso de detectores, que devem ser instalados, conectados e mantidos. A operação semi-atuada junto à gestão de uma rodovia arterial por um sistema fechado e monitorado por uma equipe é uma meta concreta para o controle de semáforos. Este tipo de estratégia é mais apropriada para vias arteriais que têm um alto volume de tráfego. Mudanças moderadas nos padrões de volume e fluxo de tráfego são facilmente acomodadas. Para esta estratégia foi desenvolvido o ATESA (Algoritmo em Temporização Semi-Atuada) (25), com base na estratégia SCOOT.

SCOOT

O SCOOT (*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*) é uma ferramenta para controle de tráfego urbano desenvolvida na Inglaterra pelo Transport and Road Research Laboratory (26). Ele é um sistema adaptativo que responde automaticamente às variações de demanda do tráfego. O SCOOT é aplicado em mais de 170 cidades na Inglaterra e em diferentes países no mundo (27), (28). Os testes mostram que, na média, o SCOOT reduz o atraso dos veículos em 12% quando comparado ao controle em tempo fixo, usando planos atualizados, calculados pelo TRANSYT (29).

SCOOT opera grupos de junções adjacentes em um tempo de ciclo comum. Em qualquer instante, o tempo de ciclo, a duração do verde e *offsets* entre sinais tem seus tempos controla-

dos por um computador armazenador. Uma característica importante do SCOOT é o modelo de tráfego. Este modelo usa informações dos detectores de veículos nas aproximações de cada junção para prever o atraso total e as paradas causadas pelos tempos semafóricos: o otimizador de sinal ajusta o tempo para reduzir este total. Frequentemente, pequenas alterações adaptam os semáforos às flutuações de curto prazo nas demandas de tráfego. Tendências de longo prazo são satisfeitas pela acumulação de pequenas alterações em alguns minutos. Então, não existem alterações súbitas nos tempos que possam perturbar o fluxo do tráfego (29).

O modelo de fila é similar ao modelo de fila do TRANSYT: vertical e sua formação ocorre na linha de retenção da via.

Seu modelo de tráfego e procedimento de otimização são similares aos do TRANSYT. O componente fundamental do TRANSYT é o PFC que também é aplicado ao SCOOT; no entanto, são utilizados detectores para medir o fluxo em tempo real. Estes detectores são localizados na entrada das aproximações que levam à interseção em interesse. Como um sistema adaptativo, SCOOT depende de bons dados de tráfego para que possa responder às mudanças no fluxo. Através dos dados do detector é obtido o perfil do pelotão de veículos que vai percorrer a via até a interseção. Este PFC é continuamente atualizado (a cada 4 segundos) e, juntamente com o fluxo de saturação e o tempo de viagem na via, prediz a fila que vai se formar na linha de parada da interseção (30).

A Figura 1.8, auxilia a análise do levantamento do PFC em tempo real. Quando os veículos passam pelo detector, SCOOT recebe a informação, converte os dados nas suas unidades internas e os utiliza para construir o PFC de cada via. A amostra de perfil exibida no diagrama está de acordo com o estado que será encontrado no semáforo quando os veículos chegarem à linha de parada em velocidade normal de cruzeiro. Veículos são modelados descendo a via em velocidade de cruzeiro e alcançando o final da fila (se presente). Conhecendo-se o tamanho L da via e a velocidade de cruzeiro dos veículos, pode-se determinar o tempo que os veículos levam para atingir a linha de parada, ou o último veículo parado em fila. Considerando-se um tamanho médio para os veículos, calcula-se também o tamanho da fila que se forma durante o tempo de vermelho. A descarga da fila é considerada à razão do fluxo de saturação.

A otimização incremental dos tempos semafóricos permite um plano de coordenação que responda às novas situações de tráfego em uma série frequente, mas pequena, de incrementos. O SCOOT aplica um plano de coordenação elástico, ou seja, que pode ser esticado ou encolhido para satisfazer a última situação verificada pela atualização do PFC.

Os otimizadores de ciclo, *split* e *offset*, agem baseados em medidas de desempenho estimadas do modelo de fila. De um modo geral, os otimizadores tendem a levar as interseções a operarem sob 90% de saturação (31).

1. Otimizador de *split* - Instantes antes da mudança de estágio, o otimizador de *split* entra em ação e busca um melhor balanceamento das saturações nas aproximações da

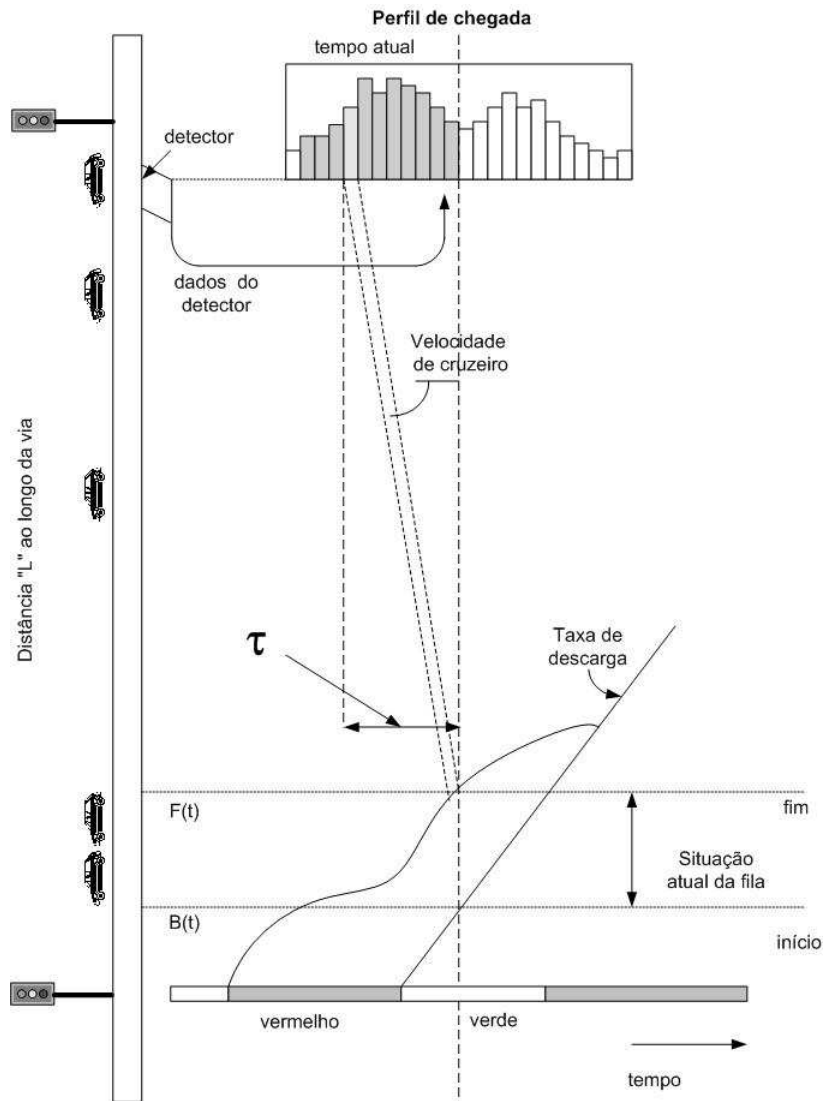


Figura 1.8 – Funcionamento do SCOOT

interseção. A decisão de encurtar, manter ou prolongar o estágio tem o propósito de minimizar o quadrado do maior grau de saturação nas vias da interseção (31).

2. Otimizador de tempo de ciclo - Para se coordenar a operação de interseções em uma sub-área, é preciso que estas estejam operando sob um mesmo tempo de ciclo, ou múltiplo deste, de modo que se garanta a manutenção das defasagens. O otimizador atua sobre as sub-áreas a cada 5 minutos. No instante de sua atuação, o tempo de ciclo que resultará num grau de saturação especificado é calculado para cada interseção da sub-área. Usando o maior dos ciclos encontrados, o SCOOT verifica se a implementação desse novo tempo de ciclo trará uma redução igual ou maior a 2% nos atrasos experimentados na sub-área controlada. Em caso afirmativo, a modificação é implementada.
3. Otimizador de *offset* - O otimizador de *offset* atua a cada ciclo, verificando se modificações da ordem de 4 segundos na programação trarão benefícios à progressão dos pelotões modelados pelo SCOOT. Isto é feito comparando-se a soma dos índices de Desempenho das vias de entrada e saída de cada interseção sob a programação semafórica atual, com aquelas obtidas com variação de 4 segundos a mais ou a menos. O SCOOT implementa aquela que fornecer a menor soma de ID.

1.3.3 Completamente Atuado (Tempo Real)

Interseções operando no modo completamente atuado não tem comprimento de ciclo fixo (24). A duração das fases é determinada pelo número de veículos que passam através das zonas de detecção dos sensores de tráfego. Tempos máximos e mínimos são definidos para cada fase. O primeiro veículo na fila (na linha de parada) garante que o tempo mínimo será dado para a fase. As detecções subsequentes estendem a fase de acordo com a necessidade até o limite máximo; após isto o verde é a próxima fase a ser implementada. Se o tempo máximo chegou e nenhum veículo está esperando na aproximação conflitante, o verde é instituído (passado o tempo máximo) até a detecção de outro veículo ocorrer. Um aspecto crítico da operação em controle completamente atuado é a manutenção dos detectores - se o detector não funciona, o tempo de verde não aparece onde os veículos estão esperando e os motoristas ficam frustrados. Este modo é apropriado onde o volume de tráfego e os padrões tem alta variação, onde interseções são isoladas (longe de outra interseção sinalizada), ou onde o volume é leve e uma resposta rápida para a detecção de veículos é desejada. Desenvolveu-se o ATERE (Algoritmo em Tempo Real) (1) baseado na estratégia PRODYN.

PRODYN

PRODYN é uma estratégia de controle de tráfego em tempo real desenvolvido na última década do século XX (29) que tem sido implementado e testado no sistema da ZELT (*Zone Expérimentale et Laboratoire de Trafic de Toulouse*). O PRODYN é baseado em um algoritmo

de Programação Dinâmica, associado à estratégia de horizonte deslizante para otimização dos tempos semafóricos (1). 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 (horizonte deslizante).

As características centrais da estratégia são (29):

1. Tempo de amostra de 5 segundos. O controle é a decisão de mudar de um estágio para outro;
2. O uso de dois laços indutivos por via: um na entrada da via, o outro a 50m da linha de parada;
3. Minimização do atraso total;
4. Uso de métodos de controle automático: estimativa bayesiana, programação dinâmica e métodos descentralizados.

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.

O gargalo de controle é a mudança de estágio e as durações máximas e mínimas destes estágios, sendo o tempo de verde restrito a estes valores.

A coordenação entre interseções é realizada de forma implícita pelo PROLYN. 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 *offline*. 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 1.9.

O critério de otimização utilizado é o atraso total, que é dado pela soma da fila vertical em todas as vias e o tempo de amostragem (29). Isto é aproximado pela soma de todas as filas sobre o tempo amostral pertencentes ao horizonte deslizante mais uma função dependente das filas e do estágio final do horizonte. A estratégia de controle é otimizar o horizonte todo, levando em consideração a previsão das filas e chegadas. O controle é então implementado para o próximo período amostral e o processo é repetido.

Os experimentos no sistema ZELT mostram ganhos médios no tempo total de viagem em torno de 10% com eficácia em 99.99% dos casos. PROLYN é capaz de estimar em tempo

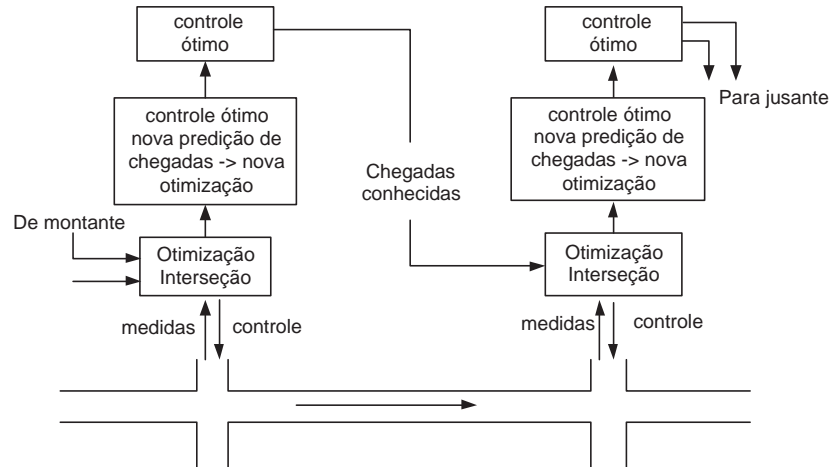


Figura 1.9 – PRO-DYN: Coordenação Implícita

real os parâmetros do tráfego como a razão dos movimentos de conversão e a razão do fluxo de saturação.

1.4 Modelo de Tráfego

O modelo de tráfego desenvolvido foi baseado na estratégia PRO-DYN e permite a simulação das condições do tráfego urbano em sub-áreas para os três algoritmos: ATEFI, ATESA e ATERE.

Consideram-se todas as interseções semaforizadas, com o mesmo tempo de ciclo e taxa de fluxo conhecida e admitida constante em um determinado período. São implementadas apenas duas fases semaforicas e o tempo total de simulação e tempo de ciclo das interseções são pré-determinados.

Tratando-se de um algoritmo mesoscópico, e objetivando reduzir o esforço computacional, o modelo de tráfego trabalha com amostras de três segundos. Para cada um destes passos, o modelo estima o fluxo de tráfego que circula nas vias.

Para impedir o conflito entre as vias em um nó, a indicação semaforica deve ser complementar. Tal relação é definida pelas seguintes equações de estado:

$$c_l(t) \in \{0, 1\}; \quad (1.4)$$

para vias arteriais,

$$c_l(t) = e_i(t), \quad (1.5)$$

e para vias secundárias,

$$c_l(t) = \overline{e_i(t)}, \quad (1.6)$$

onde a_{l,N_l} representa uma seção da via; $z_l(t)$ é o fluxo de veículos no início da via, a montante da interseção; N_l é a parte inteira de $\mathcal{N}(l)$ e r_l a parte decimal deste período $\mathcal{N}(l)$.

Os fluxos de veículos $z_l(t)$ são modelados de duas formas. Para vias alimentadas por filas a montante, as chamadas vias internas, a chegada veicular pode ser obtida pela Equação 1.12. Para as vias de entrada, $z_l(t)$ é simplesmente o resultado da contagem veicular.

$$z_l(t) = \sum_{l' \in U_l} p_{l'l} \min(m_{l'}(t) + a_{l',1}(t), sc_{l'}(t)) \quad (1.12)$$

onde, $l' \in U_l$ é o conjunto de vias a montante de l ; $p_{l'l}$ é a proporção de veículos que convergem de l' para l ; $m_{l'}$ representa a fila na via l' ; s taxa de descarga de veículos considerada constante e igual a 3 por faixa;

O modelo de tráfego fornece a dinâmica das filas através da Equação 1.13.

$$m_l(t+1) = \max(0, m_l(t) + a_{l,1}(t+1) - sc_l(t+1)), \quad (1.13)$$

O desempenho da rede, neste caso, considerado apenas o atraso veicular, é avaliado através da soma das filas no horizonte de tempo simulado,

$$ID = \sum_{j=1}^T m_l(j), \quad (1.14)$$

onde: T é o tempo total de simulação.

1.5 ATEFI

O algoritmo, desenvolvido em linguagem C, recebeu o nome de ATEFI (Algoritmo em Tempo Fixo) e é caracterizado como determinístico e descentralizado. Determinístico porque inseridos os dados de entrada, tem-se uma única sequência de operações a serem realizadas e conseqüentemente um único resultado final; descentralizado, pois o cálculo considera uma interseção de cada vez, independentemente das interseções vizinhas, considerando, no entanto, como valores iniciais para o cálculo das variáveis das interseções a jusante, a saída das interseções a montante (32).

O ATEFI visa melhorar as condições de tráfego nas cidades de pequeno e médio porte de forma eficiente e econômica.

Foi desenvolvida uma sub-rotina, que aplicada ao modelo de tráfego apresentado anteriormente, torna o ATEFI capaz de considerar tempo de amarelo simplificadaamente. Isto é

tratado considerando dois deslocamentos, inicial e final. O deslocamento inicial é um aumento no tempo de vermelho que compensa as saídas instantâneas. O deslocamento final é um aumento no tempo de verde que representa o sinal amarelo e compensa as paradas instantâneas. Quando o tempo dos deslocamentos é igual, as durações do tempo de verde e vermelho dentro de um ciclo não são alteradas, isso gera apenas uma defasagem na indicação semafórica. O algoritmo conta com uma etapa de otimização da defasagem, portanto, considera-se que o tempo de amarelo está implícito na indicação de verde, Figura 1.11.



Figura 1.11 – Indicação semafórica

Os deslocamentos D1 e D2 representam a inércia dos motoristas e veículos às indicações semafóricas, respectivamente ao início e fim do estágio de verde. O tempo D2 também considera os veículos que passam pela interseção quando o sinal ainda está amarelo. O software TRANSYT adota os seguintes valores: $D1 = 2s$ e $D2 = 3s$. Para o ATEFI, considera-se que $D1 = D2 = 3s$, que é o valor do tempo amostral. Deste modo, a duração dos tempos de verde e vermelho dentro de um ciclo não são alteradas, e tem-se apenas uma defasagem na indicação semafórica.

As vias internas que têm a determinação de seu fluxo a partir da composição de fluxos advindos de outras vias e também fecham ciclos na malha em estudo são chamadas vias especiais no ATEFI. Inicialmente, estas vias são modeladas como uma via externa. Tomando a malha da Figura 1.12 como exemplo, sabe-se que a via 10 é uma via especial. Sendo o algoritmo descentralizado, a otimização ocorre em uma interseção por vez, e no caso do ATEFI, em ordem crescente da numeração dos nós. Ao otimizar o nó 2, a via 10 ainda não possui demanda definida, pois seu nó a montante ainda não foi otimizado, e ela não recebeu a composição da demanda das vias à montante. Especificando esta via como especial, o algoritmo simula uma vez tratando-a como uma via externa, e para isso é necessário definir sua demanda do mesmo modo que as vias externas. Ao fim da simulação, a demanda da via é sobreposta pela composição das vias à montante, estabelecendo assim seu caráter de pelotão. Essa informação é guardada e o algoritmo simula novamente, tratando a via especial agora como interna e com modelamento do tipo pelotão.

1.5.1 Modelo de Otimização

O problema de otimização consiste em dado o modelo que representa os estados do tráfego urbano, encontrar a sequência de valores de controle que minimize o atraso veicular. Esta otimização é dividida em 3 etapas: otimização do tempo de verde ou *split*, otimização do *offset* e otimização do tempo de ciclo.

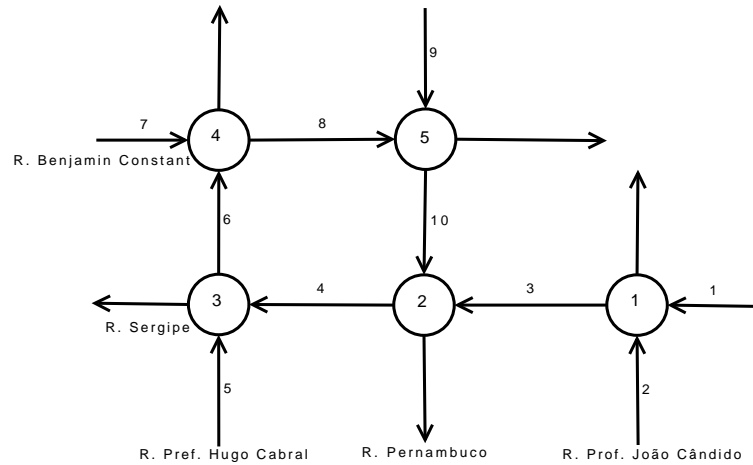


Figura 1.12 – Rede de Tráfego

Otimização do Tempo de Verde (Split)

No ATEFI não se aplica nenhum tipo de heurística para a resolução do problema de otimização do tempo de verde. Neste caso, o tempo de verde é calculado de acordo com a demanda veicular, fornecendo um tempo maior de escoamento para as vias mais carregadas.

O cálculo da indicação semafórica de acordo com a demanda veicular é realizado da seguinte maneira:

$$k = C \frac{q(l)}{q(l) + q(l + 1)}, \quad (1.15)$$

Onde: k representa o tempo de verde, C representa o tempo de ciclo, $q(l)$ o fluxo na via principal e $q(l + 1)$ o fluxo na via secundária da mesma interseção.

Otimização do *Offset*

A heurística de otimização aplicada na busca do *offset* otimizado é a Hill Climbing. É proposta uma configuração para a rede que será modificada até a obtenção de uma solução. Este processo de otimização não garante um valor ótimo global, pois o método é local no sentido de que a cada momento o algoritmo considera somente os estados imediatamente acessíveis a partir do estado atual. É como se fosse realizada uma busca em profundidade, esquecendo todos os nós que não foram escolhidos a cada nível da árvore (33). A Figura 1.13 torna a compreensão facilitada.

Para minimização da função $f(n)$ com a heurística Hill Climbing tem-se:

1. Identifica o estado atual como o estado inicial: $n_{atual} = \text{estado inicial}$. Em certas aplicações, o estado inicial pode ser gerado aleatoriamente.

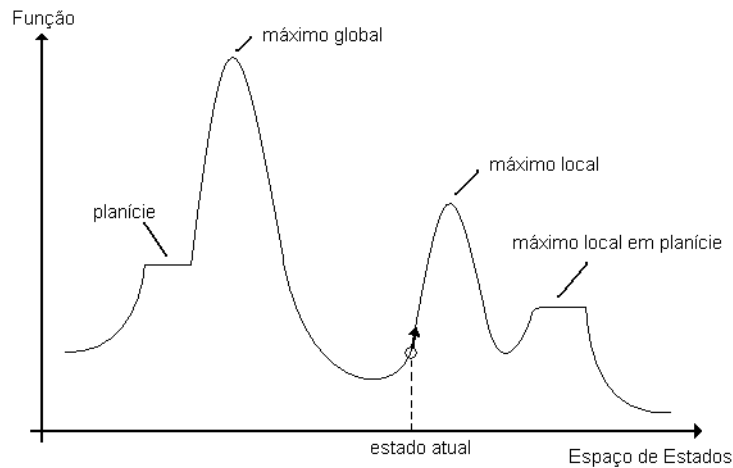


Figura 1.13 – Função a ser otimizada por Hill Climbing

2. Identifica todos os estados sucessores possíveis de n_{atual} e calcula, para cada estado sucessor n , o valor $f(n)$. Seja n_i o estado sucessor que tem o menor valor.
3. Se $f(n_i) > n_{atual}$, retornar n_{atual} . Isso significa que o algoritmo encontrou um estado que minimiza a função $f(n)$.
4. Senão, $n_{atual} = n_i$ e volta à etapa dois.

No entanto, existe o problema do ótimo encontrado não ser o ótimo global. Isto ocorre devido a dois fatores:

1. Como o algoritmo desce e para quando encontra um vale, se existir um vale abaixo deste, ele não retorna esta solução. Se o vale encontrado não corresponde a solução esperada, o algoritmo não retorna solução alguma.
2. Quando se encontra uma planície, todos os estados sucessores têm mais ou menos o mesmo valor. Nesse caso, o algoritmo faz uma busca aleatória nessa região. Quando se tem este problema, uma solução seria gerar uma outra configuração aleatoriamente e recomeçar a partir desse novo estado. A probabilidade de fazer tal escolha diminui à medida que a busca progride.

No ATEFI, a otimização busca uma coordenação semafórica para permitir que os veículos atinjam a interseção seguinte durante o tempo de verde. O ID da rede é inicialmente calculado considerando um ajuste de tempo semafórico proporcional a demanda veicular e um *offset* inicial aleatório. Posteriormente, são implementados incrementos ou decrementos (em amostras de 3 segundos) a defasagem e novos IDs são calculados. Cada novo valor de ID calculado será comparado ao ID anterior, e a direção que apresentar o menor valor será seguida (incrementar ou decrementar) até a obtenção do ótimo. Este *offset* é então fixado para a interseção em estudo. O processo termina quando todos os nós foram verificadas e os ajustes ótimos encontrados.

Otimização de Ciclo

A importância da otimização do tempo de ciclo é percebida quando tem-se a capacidade das vias sub ou super utilizadas. Ou seja, quando a interseção opera com o ciclo mínimo, mesmo que o fluxo médio de chegada seja menor ou igual à capacidade de atendimento, há formação de fila excedente na aproximação, pois qualquer perturbação na demanda reflete em fila causando um atraso aleatório. Para tempos de ciclos maiores, o efeito da variação aleatória decresce, em virtude do fluxo de chegada tornar-se mais constante.

Por indução poder-se-ia supor que quanto maior fosse o tempo de ciclo, melhor seria a operação da interseção, pois as filas excedentes tenderiam a desaparecer e o atraso aleatório tenderia a zero. Entretanto, este raciocínio não é válido, pois a medida que o ciclo aumenta, o ganho adicional de folga torna-se irrelevante e na realidade o atraso aleatório mantém-se em torno de um valor constante.

Na prática, adota-se um valor máximo para o tempo de ciclo, cujo valor recomendado é 120 segundos, no entanto, o valor adotado pelo ATEFI é de 90 segundos.

Um outro fator importante a ser considerado é que, aumentando-se o tempo de ciclo aumenta-se também o período de vermelho das aproximações, e o atraso uniforme será maior. Define-se o atraso uniforme de uma aproximação como sendo o retardamento sofrido pelos veículos que chegam durante o tempo de vermelho e são obrigados a parar, formando uma fila que é escoada ao se iniciar o próximo período de verde.

O cálculo do grau de saturação é a base para se garantir o tempo de ciclo otimizado para as interseções da rede,

$$x = \frac{Cq}{gs}, \quad (1.16)$$

onde: x representa o grau de saturação e g tempo de verde efetivo. Objetiva-se atingir um grau de saturação o mais próximo de 90% da capacidade da interseção. O processo começa com o cálculo do grau de saturação de todas as interseções para um tempo de ciclo aleatório inicial. O maior valor obtido é armazenado. Incrementa-se o tempo de ciclo em 15 segundos e recalcula-se o grau de saturação. O maior valor obtido neste caso é então comparado com o valor armazenado anteriormente. O tempo de ciclo em que se obteve o maior grau de saturação é considerado o melhor até então. Continua-se a busca até que o tempo de ciclo atinja 90s. Assim, o valor armazenado de grau de saturação será o máximo e o tempo de ciclo referente a este grau é o tempo de ciclo ótimo.

1.6 ATESA - Algoritmo de Temporização Semi-Atuada

O ATESA foi desenvolvido utilizando a ferramenta computacional MATLAB. Por se tratar de um algoritmo semi-atuado é necessária a detecção veicular na implementação física do algoritmo. Neste caso, é aplicado ao modelo de tráfego proposto um sistema capaz de gerar um vetor de ocupação veicular que será identificado pelo sistema de detecção, composto basicamente por 3 partes:

1. 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 ;
2. 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;
3. Algoritmo de contagem de veículos e taxa estimada de fluxo veicular por hora.

Com base no vetor amostra de geração de veículos, o modelo matemático gera um vetor de detecção expresso em termos de LPU da ocupação detectada para cada via. De acordo com as distribuições atribuídas no algoritmo de geração de tráfego, o sistema de detecção fornece também a contagem de veículos gerados. São considerados que a cada grupo de 3 ocupações identificadas é feita a contagem de 1 veículo. Assim, é gerado também um vetor de contagem veicular durante o tempo de simulação e geração de veículos.

1.6.1 Modelo de otimização

Os algoritmos de otimização geram um vetor de tempos semafóricos para cada interseção da rede de tráfego proposta, com os tempos de verde (1) e vermelho (0). São gerados 3 planos semafóricos para cada ciclo e estes serão utilizados durante a tomada de decisão. Deve-se lembrar que os estágios das vias que compõe uma interseção são complementares.

A implementação do vetor sinal é baseada nas medições de fluxo veicular geradas pelo algoritmo de detecção. Como tempo semafórico de partida foi considerada a razão 0,5 para tempos de verde e vermelho.

Otimizador de *split*

O otimizador de *split* altera o tempo de vigência do estágio na interseção aumentando-o em t_s (3 segundos), diminuindo-o em t_s ou mantendo o tempo atual. Os tempos de incremento e decremento são escolhidos e deve-se verificar se trarão benefícios significativos ao desempenho

do sistema. O melhor resultado define a alteração de estágio e a decisão ocorre no quarto segundo anterior a mudança.

O critério de decisão para a mudança é baseado no valor do grau de saturação medido para as vias em conflito em cada interseção. Busca-se minimizar o quadrado do grau de saturação, obtido pela Equação 1.16.

O tempo de vigência em um determinado estágio é alterado para cada caso e calcula-se o grau de saturação, comparando o quadrado deste grau para definir a melhor decisão a ser tomada. Para o aumento do tempo vigente de estágio têm-se a Equação 1.17.

$$w_i^*(T + 1) = w_i(t) + 8 \quad \text{para } (x_l^a)^2. \quad (1.17)$$

Como já se sabe, a tomada de decisão acontece no final do quarto segundo anterior a mudança de estado, instante T. Dessa forma, adicionam-se 6 segundos, sendo 3 segundos o tempo necessário para a finalização do estágio e os outros 3 segundos de aumento do tempo vigente.

Para o caso de diminuição do tempo de vigência do estágio tem-se a Equação 1.18.

$$w_i^*(T + 1) = w_i(t) \quad \text{para } (x_l^d)^2, \quad (1.18)$$

E para a permanência do tempo do estágio, Equação 1.19.

$$w_i^*(T + 1) = w_i(t) + 3 \quad \text{para } (x_l^m)^2, \quad (1.19)$$

Otimizador de *offset*

Este algoritmo faz a varredura do tempo total de amostragem. A decisão é tomada no meio do estágio principal e implementada somente no ciclo seguinte.

O modelo calcula o índice de desempenho para cada via da intersecção utilizando o método gráfico, que afirma que o atraso é numericamente igual a área do gráfico de carga e descarga de fila. Sabe-se que,

$$A_g(i) = ID_i, \quad (1.20)$$

onde, A_g é o valor numérico da área do gráfico de carga e descarga de veículos, ID_l é o atraso veicular da via l . Passando para um tempo t de amostragem discreto,

$$ID_l(t) = \sum_{t=1}^{C_i} m_l(t), \quad (1.21)$$

onde, $ID_l(t)$ é o atraso veicular até o instante t , $m_l(t)$ é a fila acumulada até o instante t e C_i é o tempo de ciclo da interseção i .

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

$$ID_l(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^{C_i} m_l(t), \quad (1.22)$$

Monta-se uma matriz de decisão para o controlador de *offset*. É então escolhida a menor soma do índice de desempenho de cada via para cada variação de *offset* na interseção.

Otimizador de Ciclo

O otimizador de ciclo objetiva uma melhor coordenação entre interseções de uma determinada região. O critério de decisão é baseado no nível de saturação desejado para a via, suprimindo tanto ociosidade, quando o tempo de ciclo é maior que o necessário para a via, quanto sobressaturação, no caso do tempo de ciclo ser menor que o mínimo necessário para garantir fluidez no tráfego. Para este modelo foi estabelecido o nível de saturação em 90%.

A regulação do tempo de ciclo será calculada utilizando a Equação 1.16. Assim, possuindo-se o fluxo veicular, o grau de saturação e o fluxo de saturação da via em destaque pode-se obter uma relação de proporção de verde que regule o ciclo da área controlada. É realizada uma comparação entre interseções visando uma correção de eventuais discrepâncias, já que este otimizador tem caráter centralizado.

O grau de saturação máximo da interseção, ou seja, o maior nível de saturação dentre as vias que compõe a interseção, passa a ser o representante desta, Equação 1.23.

$$x_i^{\max}(t) = \max x_l(t), \quad (1.23)$$

onde $x_i^{\max}(t)$ é o maior grau de saturação da interseção i , $x_l(t)$ é o grau de saturação de cada via l da interseção i

Tendo escolhido o grau de saturação que representará a interseção, aplica-se este valor na Equação 1.16 e pode-se obter o valor de ciclo para a interseção em questão.

A decisão é tomada com base no maior ciclo mínimo identificado. Este valor é então aplicado as demais interseções formadoras da região.

1.7 ATERE - Algoritmo em Tempo Real

Apresenta-se o desenvolvimento de um algoritmo completamente atuado ATERE (Algoritmo em Tempo Real) (1) para simulação do tráfego urbano e suas características.

O modelo aplicado na estratégia de controle PRODYN foi base para o desenvolvimento do ATERE. Este visa melhorar as condições de tráfego em cidades de todo porte. No entanto, planos em tempo real são onerosos devido à necessidade de instalação de sensores, bem como um sistema de transmissão de dados em tempo real; por isto, são mais utilizados em cidades de grande porte.

1.7.1 Modelo de Otimização

A idéia central do algoritmo de otimização é testar todas as possibilidades de controle em um horizonte de tempo e escolher dentre todas aquela que produz o melhor desempenho.

Com o auxílio do modelo de tráfego é possível avaliar o Índice de Desempenho, que neste trabalho é medido pelo atraso acumulado no conjunto de todas as faixas l e em um horizonte $K + 1$, conforme Equação 1.14.

O algoritmo de otimização utiliza a técnica de horizonte deslizante para tentar prever o comportamento do tráfego e descobrir o melhor controle para o futuro. A técnica consiste em simular, entre dois instantes de controle, a evolução do sistema durante vários períodos. Ao final, tem-se o valor ótimo do controle a ser aplicado, o qual irá vigorar apenas durante o período subsequente. O processo é repetido para todos os períodos. As possibilidades criadas pelo horizonte deslizante podem ser representadas por uma árvore de decisão.

A árvore de decisão assim obtida é adequada para organizar a tarefa de testar todas as possibilidades. Ela é montada a partir das diferentes opções que uma decisão entre a indicação verde ou vermelha pode oferecer. Cada nova situação de tráfego criada tem um custo quantificado em atraso veicular. Um algoritmo de busca faz a tarefa de encontrar o caminho na árvore que resulte no menor custo. O resultado levará ao controle a ser aplicado no período subsequente.

Horizonte Deslizante

O procedimento de horizonte deslizante pode ser descrito da seguinte forma: a técnica exige o conhecimento das chegadas de veículos no período inicial. Para os períodos futuros

do horizonte são utilizadas previsões das chegadas. Estas previsões são obtidas para todas as possibilidades de controle durante um horizonte de tempo K , com $k = 1, \dots, K$. O horizonte de tempo considerado neste algoritmo é $K = 8$, considerando o tempo de amostra $t_s = 4$, o tamanho do horizonte previsto é de 32 segundos.

O procedimento de otimização define o caminho de menor custo. Com este resultado, o controle aplicado em $k = 1$ é estipulado por este caminho de menor custo e é implementado no período subsequente, permanecendo vigente até que o procedimento seja repetido e novamente atualizado.

O resultado da aplicação do horizonte deslizante é representado por uma árvore de decisão. Esta árvore, para um semáforo de duas fases, é binária, pois, a decisão é tomada sobre uma variável discreta que pode assumir dois estados: a indicação verde (0) ou vermelha (1). Os nós da árvore representam os estados do sistema. Suas arestas representam o custo da transição de um estado para outro, neste caso o atraso veicular, dado pela Equação 1.14. Um exemplo desta árvore pode ser analisado na Figura 1.14, que representa uma árvore completa para $K = 3$.

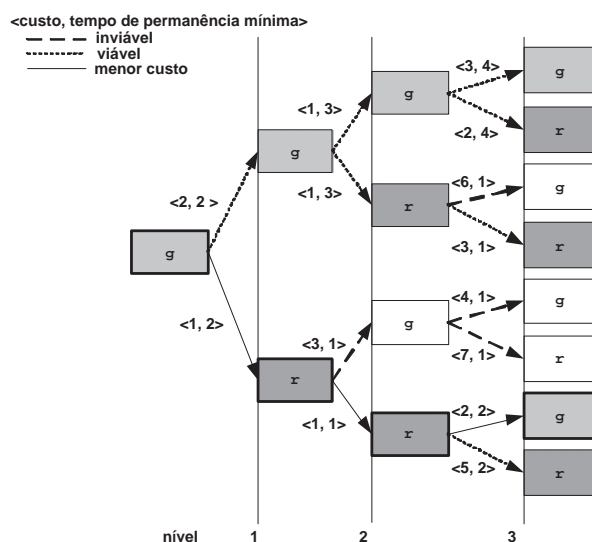


Figura 1.14 – Árvore de Decisões

Pode-se observar na Figura 1.14 que a busca é realizada em profundidade. Primeiramente, percorre-se o ramo superior da árvore, mantendo a indicação verde (g), até a última folha e analisa-se o custo obtido, neste caso igual a 6. Posteriormente, é testado o caminho que faz a mudança para indicação vermelha (r), no ramo inferior da árvore. Ao se atingir a última folha, os valores de custo são comparados e continua-se a busca no interior da árvore. Esta busca continua até ser encontrado o menor custo no último nível da árvore, desde que respeite o tempo de verde mínimo, descartando os outros caminhos que apresentaram custo maior. O caminho selecionado está realçado na figura e apresentou custo 4.

Predição de Chegadas

A predição de chegadas é realizada com o auxílio de um modelo de predição baseado no modelo de tráfego apresentado. São consideradas chegadas o número de veículos que entram nas vias externas.

O cálculo das chegadas é realizado *offline*. Com estes dados é montada uma tabela com a quantidade de veículos que chegam em cada nível do horizonte de tempo considerado, pela quantidade de vias do sistema. Para as vias internas, que não recebem fluxo externo, é realizado um cálculo com a soma das proporções de conversão de veículos das vias que descarregam fluxo no caminho em questão.

Para simplificar o modelo, as indicações semafóricas em cada interseção, no período inicial do horizonte, são consideradas constantes para todo o horizonte. Esta consideração não implica em erros significativos pois, a cada tempo de amostragem é feita uma atualização de chegadas e refeito o cálculo de predição, corrigindo assim possíveis desvios.

A predição de chegadas é realizada sempre anterior ao cálculo do controle realizado durante o horizonte deslizante. Durante o procedimento de horizonte deslizante a predição de entradas é realizada da mesma forma, no entanto o tipo de chegadas pode ser definido pelo operador, assim a quantidade de veículos que chegam no primeiro período do horizonte é conhecida, resultante das contagens nos detectores. Para os períodos seguintes pode ser utilizada: chegada constante, a média dos períodos anteriores ou chegada nula de veículos.

Busca em Profundidade

O algoritmo de busca escolhido foi o de busca em profundidade devido a simplicidade do método, rapidez na obtenção de uma solução e pequeno consumo de memória, já que é realizada em um caminho de cada vez. No entanto, uma desvantagem do método é a variedade de combinações de caminhos que cresce exponencialmente com o tamanho do horizonte. Devido a isso, algumas modificações foram implementadas com o objetivo de restringir a busca em todos os caminhos de uma árvore.

A principal modificação é permitir que a decisão a ser tomada possa ser explorada alternativamente na árvore. Isto é, a busca é realizada, inicialmente, em uma direção da árvore, até atingir o último nível de profundidade, depois a busca retorna ao nó inicial e parte para a outra direção de busca. O valor do desempenho obtido no último nível da árvore, na direção inicial, é considerado o melhor até que uma busca em outro ramo qualquer (ao atingir o último nível) resulte em um valor de desempenho menor; neste ponto, o último passa a ser o melhor. Outra modificação é o descarte da busca em um determinado ramo ao ser obtido um valor de desempenho maior do que considerado ótimo até aquele momento da busca. Tal procedimento pode seguir até que seja realizada a busca em todos os ramos viáveis ou até

que se atinja o limite de tempo disponível para o cálculo, quando então é adotada a decisão vencedora.

A busca em profundidade tem duas restrições: (i) o *dead-line* e (ii) o tempo mínimo de duração da indicação semaforica que deve ser dado pela Equação 1.24

$$c_i(t) = e_i(t) \quad \text{se} \quad w_i(t) < w_{min} \quad (1.24)$$

A necessidade deste limite mínimo é justificada pelo custo da troca das indicações, baseado no tempo mínimo para que os veículos que estejam parados em uma fila possam se deslocar através da interseção.

Para redes com um número maior de estágios em uma interseção, o algoritmo de busca em profundidade pode causar uma explosão combinatória, já que de cada nó parte um número de ramos igual ao número de estágios.

Referências

- [1] CERVANTES, S. G. S. *Um Algoritmo Descentralizado para Controle de Tráfego Urbano em Tempo Real*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Agosto 2005.
- [2] MOREIRA, R. B. *Uma contribuição para avaliação do modelo CORSIM em simulações de Tráfego urbano no Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado) — COPPE/URFJ, 2005.
- [3] GERLOUGH, D. L.; HUBER, M. J. *Traffic flow theory*. Washington, D. C., n. Special Report, V. 165, 1975.
- [4] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). *Manual de Semáforos*. Segunda edição. Brasília, Brasil, 1984.
- [5] TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE. *Passer V*. In: . Texas, United States, 2006.
- [6] ADVANCED CORSIM Training Manual. Minnesota, US, January 2008.
- [7] HUSCH, D.; ALBECK, J. *Synchro 4.0 User Guide*. Albany, California, 1999.
- [8] CRABTREE, M.; VINCENT, R.; HARRISON, S. *TRANSYT/10 User Guide*. United Kingdom, 1996.
- [9] LOWRIE, P. The Sydney co-ordinated adaptive traffic system - principles, methodology, algorithms. In: IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ROAD TRAFFIC SIGNALING. [S.l.], 1982. v. 82, n. 207, p. 67–70.

-
- [10] BRETHERTON, D. The SCOOT urban traffic control system. *Traffic Advisory Leaflet*, v. 7/99, April 1999.
- [11] LIAO, L. C. *A Review of the Optimized Policies for Adaptive Control Strategy (OPAC)*. Berkeley, United States, 1998.
- [12] WEBSTER, F. V. *UTOPIA Network management and control*. [S.l.], 1957.
- [13] MIRCHANDANI, P.; HEAD, L. Rhodes: A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. In: *TRISTAN III Meeting*. Puerto Rico: [s.n.], 1998.
- [14] KELLY, T. Extending the ALLONS traffic control algorithm to systems of signalized intersections. Michigan, 1998.
- [15] FARGES, J. L.; KHOUDOUR, L.; LESORT, J. B. Prodyn: on site evaluation. In: *PROC. ROAD TRAFFIC CONTROL, 3TH INTERNATIONAL CONFERENCE*. Washington, DC., 1990. p. 62–66.
- [16] PIAI, J. C. *Um algoritmo em tempo fixo para controle de tráfego urbano*. Londrina, Paraná: [s.n.], Novembro 2006. Trabalho de conclusão de curso.
- [17] KUESTER, J. J.; MIZE, J. H. *Optimization Techniques with Fortran*. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 1973. ISBN 0070356068.
- [18] MARTELLO, S.; TOTH, P. *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.
- [19] ROBERTSON, D. I. TRANSYT: A traffic network study tool. In: *ROAD RESEARCH LABORATORY*. Crowthorne, England, 1968.
- [20] BINNING, J.; BURTENSHAW, G. Green light for TRANSYT 13. *Traffic Software News*, March 2008.
- [21] RAKHA, H. A.; AERDE, M. W. V. A comparison of the simulation modules of the TRANSYT and INTEGRATION models. *Transportation Research Record*, v. 1566, p. 1–7, 1996.
- [22] HOUNSELL, N. B.; MCDONALD, M. Urban network traffic control. *Institution of Mechanical Engineers*, v. 215, p. 325–334, 2001.
- [23] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in search optimization and machine learning*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.
- [24] JR, W. B.; PIETRANTONIO, H. Utilização de semáforos atuados pelo tráfego. www.sinalde.transito.com.br/artigos, Setembro 2007.
- [25] ENDO, W. *Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano Baseado em Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, Dezembro 2006.

-
- [26] HUNT, P. B.; ROBERTSON, D. L.; BRETHERTON, R. D. The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Eng. Control*, v. 23, p. 190–192, 1982.
- [27] MING, S. H. *NT 201 - Uma breve descrição do sistema SCOOT*. [S.l.], maio 1997.
- [28] COEYMANS-AVARIA, J.; et al. SCOOT in Santiago. In: 23RD EUROPEAN TRANSPORT FORUM. [S.l.], 1995. v. 394, p. 183–195.
- [29] SHEPHERD, S. P. A review of traffic signal control. *Institute of Transport Studies, University of Leeds*, ITS Working Paper 349, 1992.
- [30] WILSHIRE, R. et al. *Traffic Control System Handbook*. Institute of Transportation Engineers. 1099 14th Street, NW, Suite 300 West — Washington, DC 20005-3438 USA, April 1985.
- [31] LOUREIRO, C. F. G.; GOMES, M. J. T. L.; LEANDRO, C. H. P. Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de interseções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real. In: XVI ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. [S.l.], 2002. v. 1, p. 365–376.
- [32] VILANOVA, L. M. Siri - um novo simulador para redes de semáforos. *ITS Panamericano*, 2006.
- [33] MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. B. *How To Solve It: Modern Heuristics*. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

Objetivos

2.1 Geral

- Análise de diferentes técnicas de controle semafórico e adequação as características específicas de uma rede viária;

2.2 Específicos

- Validação do modelo de tráfego dos algoritmos desenvolvidos pelo grupo de estudo;
- Avaliação do desempenho dos algoritmos em uma malha viária central da cidade de Londrina-PR.

Artigo para Publicação

Algoritmos para Controle de Tráfego Urbano - Estudo Comparativo

ABSTRACT

Os problemas de congestionamento, que aumentam o tempo em que usuários ficam parados em seus veículos ou transportes coletivos, vem tomando dimensões inaceitáveis na atualidade. Métodos de otimização que apresentam temporizações de semáforos que minimizem as paradas e atrasos são uma solução para sistemas ainda não saturados. Este trabalho apresenta a evolução de algoritmos de controle de tráfego urbano desde o controle semaforico em tempo fixo, ao controle em tempo real, percorrendo três etapas de desenvolvimento. A primeira delas, o algoritmo em tempo fixo que otimiza tempo de verde, defasagem e tempo de ciclo, baseado na estratégia já consagrada TRANSYT/10. O algoritmo é *offline*, ou seja, depende do conhecimento da demanda veicular total do sistema. Posteriormente, um algoritmo semi-atuado que apresenta as mesmas otimizações do modelo anterior, no entanto, efetua os cálculos de maneira diferenciada. A demanda, neste caso, é verificada em tempo real através de detectores veiculares. Finalmente, um algoritmo em tempo real com minimização de atraso em resposta a variação da demanda detectada. O modelo de tráfego proposto foi validado através de sua comparação com o modelo de tráfego do TRANSYT. Além disso, também compara-se o desempenho dos três algoritmos através do atraso verificado para uma sub-rede da malha viária central da cidade de Londrina-Paraná, Brasil. O trabalho tem como objetivo a criação de uma estratégia de controle que utilize os três algoritmos desenvolvidos em uma central de controle de tráfego. Dessa forma, será possível a adequação do algoritmo às características das áreas controladas.

3.1 Introdução

São muitos os algoritmos para controle de tráfego urbano que têm como objetivo a diminuição de atrasos e paradas nos deslocamentos de pessoas e produtos. A base de desenvolvimento destas técnicas é um modelo de fluxo de tráfego e um algoritmo de otimização segundo um critério de desempenho específico.

Em meados da década de 70, surgiram pesquisas sobre sistemas de controle de tráfego descentralizados que atuam em todas as interseções através de um sistema de tempos fixos ou de planos de tempos variáveis. Estes sistemas trabalham com dados históricos de demanda veicular para diferentes horários do dia e dias da semana. Os cálculos, de forma geral, buscam ajustes otimizados para os tempos de verde, defasagens e ciclos. Os exemplos destas estratégias são o TRANSYT (34), MAXBAND (35), PASSER II (36), entre outros.

Posteriormente, surgiram os sistemas de controle descentralizados em tempo real. Estes realizam cálculos da melhor temporização semaforica baseados em medidas de fluxo detectadas localmente, próximas à cada interseção (37). Alguns destes métodos otimizam as variáveis de tempo de verde, defasagem e ciclo, como o SCOOT (38) e SCATS (39), também chamados de algoritmos de controle de tráfego semi-atuados. Outros aplicam a técnica de horizonte deslizante para o cálculo das temporizações. Nestes métodos, os cálculos produzem um grande número de possíveis ações de controle em um horizonte de tempo futuro. A decisão de qual a melhor ação de controle a ser aplicada depende do índice de desempenho adotado, normalmente uma combinação de atraso e número de paradas. É utilizado no cálculo uma predição das chegadas de veículos que são frequentemente atualizadas para garantir um bom desempenho. Assim, para a metodologia de horizonte deslizante é adotado um intervalo (tipicamente menor que 5 segundos) durante o qual a ação de controle não é alterada. Durante este intervalo é necessário calcular a próxima decisão de controle baseada nas predições de chegadas atualizadas. Os exemplos de aplicação destes métodos são o OPAC (40), PRODYN (41), RHODES (42), ALLONS-D (43) e CRONOS (44).

Este artigo apresenta três algoritmos. O primeiro em tempo fixo (ATEFI - Algoritmo em Tempo Fixo), baseado no modelo TRANSYT. O segundo, descentralizado semi-atuado (ATESA - Algoritmo em Temporização Semi-Atuada), baseado no modelo SCOOT e o último, também descentralizado e em tempo real (ATERE - Algoritmo em Tempo Real), baseado no modelo PRODYN. O desenvolvimento destes algoritmos faz parte do estudo de uma estratégia de controle descentralizada, que atenda cidades que não comportam os custos de uma estratégia em tempo real para a totalidade de sua malha viária. Desta forma, pode-se proporcionar à gerência de tráfego destes municípios a possibilidade de adequar gradativamente o controle em tempo fixo para tempo real em suas interseções de forma coordenada.

Os resultados de simulações foram comparados entre os três algoritmos e também com o TRANSYT 10®. Foi validado o modelo de tráfego desenvolvido, e analisou-se o desempenho de cada um dos algoritmos. A avaliação foi baseada em dados de cenários reais de demanda

da malha viária central da cidade de Londrina-PR, Brasil.

3.2 Modelo de Tráfego

Para tornar possível a validação do modelo de tráfego, é necessário que este seja analisado independentemente dos modelos de otimização. Desta forma, considera-se no modelo uma entrada veicular com distribuição uniforme e ciclo fixo para todos os algoritmos desenvolvidos. Assim, torna-se possível comparar o modelo de tráfego com o TRANSYT, que será o mesmo para o ATEFI, ATESA e ATERE.

Neste modelo, as equações de estado representam a dinâmica discreta do tráfego utilizando três variáveis de estado: o tamanho vertical da fila na linha de retenção, o número de veículos (fluxo veicular), a distribuição de veículos nas seções de uma via e o estágio vigente das vias. A arquitetura do modelo de tráfego é descentralizada, ou seja, cada interseção é tratada individualmente sendo a otimização dos tempos semafóricos realizada localmente.

A temporização semafórica é proporcional a demanda veicular na via, respeitando um limite mínimo de verde, sendo que a ação de controle realizada no instante t torna-se o estágio vigente no intervalo entre t e $t + 1$. Para impedir o conflito entre as vias em um nó, a indicação semafórica deve ser complementar, de acordo com as equações de estado,

$$c_l(t) \in \{0, 1\}, \quad (3.1)$$

para vias arteriais,

$$c_l(t) = e_i(t), \quad (3.2)$$

e para vias secundárias,

$$c_l(t) = \overline{e_i(t)}, \quad (3.3)$$

em que e_i é a indicação semafórica vigente; $c_l(t)$ o controle de sinal na via; i representa o nó em estudo; 0 a indicação vermelha e 1 indicação verde.

O fluxo veicular $z_l(t)$ é considerado conhecido e constante. A via é dividida em seções para representar a movimentação do fluxo nesta. O número de seções em uma via pode ser obtido da seguinte forma,

$$\mathcal{N}(l) = \frac{L_l}{v_l t_s}, \quad (3.4)$$

onde L_l é o comprimento da via, v_l é a velocidade de cruzeiro e t_s a duração do tempo amostral.

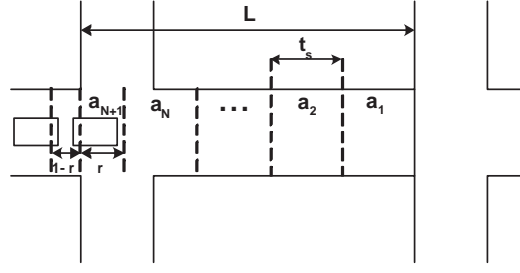


Figura 3.1 – Seções de uma via.

$\mathcal{N}(l)$ é tipicamente um número fracionário, assim poderá existir $N_l = \text{trunc}(\mathcal{N}(l))$ seções de tamanho $c = v_l t_s$ mais um número de seções $L_l - N_l v_l t_s$. A Figura 3.1 reproduz as seções da via.

Com estas considerações, as equações seguintes descrevem a dinâmica das vias,

$$a_{l,j}(t+1) = a_{l,j+1}(t), j = 1, \dots, N_l - 1 \quad (3.5)$$

$$a_{l,N_l}(t+1) = a_{l,N_l+1}(t) + (1 - r_l)z_l(t) \quad (3.6)$$

$$a_{l,N_l+1}(t+1) = r_l z_l(t) \quad (3.7)$$

As vias internas são obtidas pelas proporções de conversão das vias de entrada, ou seja,

$$z_l(t) = \sum_{l' \in U_l} p_{l'l} \min(m_{l'}(t) + a_{l',1}(t), sc_{l'}(t)), \quad (3.8)$$

onde, $l' \in U_l$ é o conjunto de vias a montante de l ; z_l número de veículos que chegam à via l ; $p_{l'l}$ é a proporção de veículos que convergem de l' para l ; $m_{l'}$ representa a fila na via l' ; $a_{l',1}$ é o número de veículos que chegam à via l' ; s a taxa de descarga de veículos considerada constante e igual ao fluxo de saturação.

A fila vertical formada na linha de retenção pode ser obtida por,

$$m_l(t+1) = \max(0, m_l(t) + a_{l,1}(t+1) - sc_l(t+1)). \quad (3.9)$$

O índice de desempenho do modelo é medido pelo atraso causado por filas nas interseções,

$$ID = \sum_{j=1}^T m_l(j), \quad (3.10)$$

onde T é o tempo total de simulação.

Equações para representação dinâmica da duração do estágio vigente são aplicadas ao modelo quando utilizada a otimização do tempo de verde. Considera-se também uma variável de ocupação dos detectores (laços indutivos) e o volume de tráfego veicular circulante na região.

A duração no estágio vigente $w_i(t)$ é medida em números de intervalos,

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + 1 & \text{se } c_i(t) = e_i(t), \\ 0 & \text{se } c_i(t) \neq e_i(t), \end{cases} \quad (3.11)$$

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

3.3 Modelo de Otimização

3.3.1 ATEFI

São três as variáveis otimizadas no algoritmo: o tempo de verde, o tempo de defasagem entre interseções e o comprimento do ciclo da interseção i .

Otimização do tempo de verde

Para a otimização do tempo de verde é considerada uma proporção igual à distribuição da demanda entre as vias em conflito, ou seja,

$$k = C \frac{q(l)}{q(l) + q(l+1)}, \quad (3.12)$$

onde, k representa o tempo de verde, $q(l)$ o fluxo na via principal, $q(l+1)$ o fluxo na via secundária da mesma interseção e C o tamanho do ciclo da interseção i .

Otimização da defasagem

Para a defasagem desenvolveu-se uma aplicação do algoritmo *Hill Climbing* buscando minimizar uma função $f(x)$, sendo x estados discretos. Neste caso, $f(x)$ é representado pelo índice de desempenho da rede. A variável x tem um estado inicial aleatório, que é alterado de modo a garantir a diminuição no valor de $f(x)$, até que um mínimo seja encontrado, (45). A seguir um pseudo-código de implementação do processo.

```
função(HILL-CLIMBING(problema))retorna(um estado que é mínimo local)
  entrada : problema
  variáveis locais : atual,
    vizinho.
  atual = condição inicial do problema;
  loop do
    vizinho = valor menor na redondeza;
    se (vizinho) >= (atual) então retorna (atual)
    senão atual = vizinho;
```

Otimização do ciclo

A otimização do ciclo é baseada na determinação de um valor de grau de saturação x , (índice de utilização de uma via). É considerado um valor ideal para um conjunto de vias, neste trabalho igual a 90%, sendo,

$$x = \frac{Cq}{gs}, \quad (3.13)$$

onde: g é o tempo de verde efetivo.

No processo de otimização, calcula-se o grau de saturação para todas as aproximações da malha e armazena-se o maior valor. São realizados incrementos (ou decrementos) de 15 segundos ao tempo de ciclo e calcula-se novamente o grau de saturação a cada iteração para todas as aproximações das interseções da malha. Comparam-se os valores armazenados com os novos obtidos nas iterações, armazenando-se sempre o maior entre eles. Tendo-se obtido o maior grau de saturação, o valor correspondente do incremento é implementado ao tempo de ciclo. O processo é repetido em intervalos de 2 a 5 minutos, com o objetivo de aproximar o grau de saturação vigente ao valor ideal. A implementação é feita no ciclo posterior ao da realização do cálculo.

3.3.2 ATESA

O algoritmo de controle do ATESA aplica três otimizadores: de porcentagem de verde, defasagem e ciclo. As variáveis são as mesmas aplicadas no ATEFI, no entanto, a forma de decisão é diferenciada.

Otimização do tempo de verde

O otimizador de tempo de verde modifica o tempo de um estágio dentro de um ciclo, alterando-o sem interferir no tempo total de ciclo. Este otimizador atua 5 segundos antes

do instante previsto para mudança de estágio. Desta forma, uma decisão é tomada pelo otimizador: encurtar o estágio em 4 segundos (tempo amostral), manter a mesma duração do estágio ou prolongá-lo em 4 segundos.

Após a tomada de decisão, a atuação do otimizador no ciclo seguinte terá um acréscimo de 1 segundo caso a decisão tenha sido prolongar o estágio. Se a decisão foi encurtar o estágio, o otimizador atuará 1 segundo antes do previsto. No caso de estágio mantido, o otimizador entrará em ação nos mesmo 5 segundos anteriores a mudança de estágio.

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 3.13 e a decisão é determinada pela escolha do menor dos máximos quadrados do grau de saturação de cada intersecção.

Otimização da defasagem

Este otimizador atua uma vez a cada ciclo, tomando uma decisão no meio do estágio principal e implementando-a, somente no ciclo seguinte. 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 parâmetro de decisão do otimizador de defasagem é o Índice de Desempenho das vias, neste caso fornecido pelo atraso, (Equação 3.10). Este é calculado para as três condições: aumento, diminuição e permanência do tempo de *offset* para cada uma das vias de uma intersecção. Os valores obtidos em cada situação para as vias da intersecção são somados e realiza-se a comparação entre as somas, selecionando o *offset* relacionado a menor delas para ser aplicado à intersecção.

Otimizador de ciclo

O otimizador de ciclo atua uma vez a cada 5 minutos e tende a minimizar o tempo de ciclo de forma a atingir um nível de saturação desejado (90%) para uma determinada região de controle.

Calcula-se o tempo de ciclo para cada aproximação da intersecção, com base no nível desejado de saturação através da Equação 3.13. Tendo-se encontrado os tempos de ciclo das aproximações, escolhe-se o menor entre eles. Este é denominado o tempo de ciclo ideal da intersecção (*ideal node cycle time*) e será utilizado na comparação com os tempos de ciclo ideais de outras intersecções. O maior tempo de ciclo ideal será definido com o tempo de ciclo da região de controle.

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.

3.3.3 ATERE

O algoritmo de controle usa o método de busca em profundidade para testar todas as possibilidades de controle para um horizonte de tempo pré-definido. A escolha do controle corresponde ao primeiro valor da melhor trajetória do horizonte, ou seja, aquela que leva ao menor custo. Este modelo considera a fila vertical, simplificação também aplicada nas estratégias PROLYN (41), SCOOT (46) e ALLONS-D (47).

Com a intenção de representar todas as trajetórias possíveis para o horizonte, o algoritmo constrói uma árvore de decisão, cuja estrutura de dados ajuda na organização da avaliação das alternativas de controle.

Horizonte Deslizante

O procedimento de horizonte deslizante, também aplicado nas estratégias PROLYN, OPAC e ALLONS-D, consiste na geração de previsões do comportamento do sistema para um dado horizonte de tempo futuro. Este comportamento é descrito por trajetórias organizadas em uma árvore de decisão como mostra a Figura 3.2. A árvore é binária, correspondendo a duas possíveis decisões: permanecer no estado corrente ou mudar de estado. Os nós da árvore armazenam o custo de transição entre o nó anterior e o nó em questão. O custo é dado pelo atraso veicular causado pela fila média nas interseções durante um intervalo. Aplica-se a busca em profundidade para encontrar o caminho do menor atraso ao longo dos ramos da árvore.

Alguns ramos da árvore acabam não sendo viáveis, pois violam a restrição de verde mínimo, que é a necessidade em manter a indicação no estágio vigente por pelo menos 12 segundos, valor empiricamente adotado em função dos custos de chaveamentos do controlador. As caixas brancas correspondem a estados inacessíveis.

Computação Descentralizada

Para uma área que compreende dezenas de interseções, torna-se complexo simular todas as opções de controle em um dado intervalo do horizonte. No caso proposto de duas decisões possíveis para cada intervalo de controle, existem $2N$ possibilidades, onde N é o número de interseções. Se o horizonte compreende K passos de tempo, o número de decisões possíveis é da ordem de $2NK$, que pode se tornar intratável rapidamente. Fazendo frente a este tópico

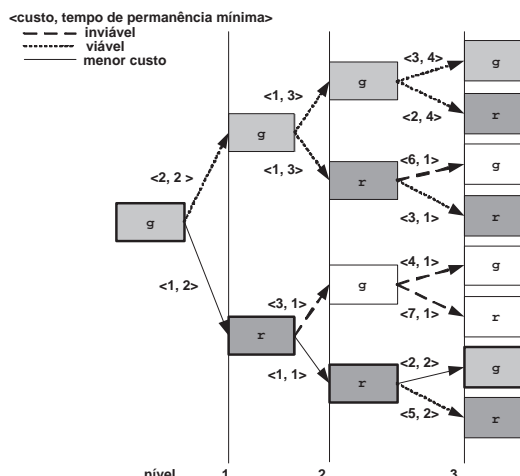


Figura 3.2 – Árvore de Decisão.

complexo, o esquema descentralizado é proposto. Controles são avaliados para cada interseção considerando que todas as outras interseções da rede mantêm o estágio atual durante a varredura do horizonte. Com esta proposta, os veículos que atingem uma determinada interseção podem ser computados de antemão por todo o horizonte.

Predição de Chegadas

A predição de chegadas é realizada com o auxílio de um modelo de predição baseado no modelo de tráfego do ATERE. Algumas simplificações foram realizadas para tal aplicação:

1. as simulações de predição são realizadas o número de vezes que o horizonte é dividido em períodos;
2. o controle que vigora no período inicial do horizonte, isto é, as indicações semaforicas de cada interseção, é considerado constante para todo o horizonte;
3. o tipo de chegada pode ser definido pelo operador: a quantidade de veículos que chegam no primeiro período do horizonte é conhecida, resultante das contagens nos detectores. Para os períodos seguintes pode ser utilizada a média dos períodos anteriores (no tamanho igual ao número de períodos do horizonte) ou chegada nula de veículos.

Coordenação Implícita

A arquitetura descentralizada do modelo e do algoritmo de controle dificulta uma estratégia de coordenação entre as interseções. No entanto, como no PRODYN e ALLONS-D, a coordenação ocorre de forma implícita devido à incorporação de dados das interseções a montante da interseção analisada. Ou seja, quando os cálculos de otimização são realizados

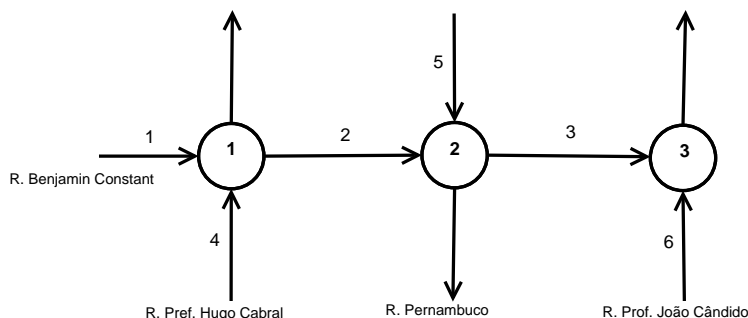


Figura 3.3 – Malha viária.

para uma interseção, são conhecidos os dados de saída da interseção a montante considerando constante para todo o horizonte a indicação semafórica vigente. Desta forma, a coordenação entre interseções é obtida implicitamente. Uma coordenação explícita também pode ser obtida através de restrições introduzidas ao algoritmo. Uma implementação deste tipo de coordenação, para o algoritmo de controle aqui proposto pode ser visto em (48).

3.4 Resultados

Para avaliar a consistência dos algoritmos propostos foi apresentada uma comparação com a estratégia TRANSYT.

Os testes foram realizados em uma rede de três interseções em uma via arterial de sentido único de fluxo mostrada na figura 3.3. O comprimento total da via arterial é de aproximadamente 300 m divididos em 3 arcos de 100 metros. A velocidade dos veículos é considerada constante a um valor de 11,1 metros/segundo, ou 40,0Km/h.

As amostras de tempo dos algoritmos são de 3 segundos. O fluxo de saturação é igual a 3 veículos por amostra de tempo, também considerado conhecido e constante para todas as vias. A capacidade das vias é de 1800 veículos por hora (vph) em cada faixa, sendo que as vias em estudo são compostas por duas faixas. O ciclo aplicado é de 45 segundos e o horizonte T de simulação $T = 60$ min.

A entrada veicular fixa utilizada para a validação do modelo de tráfego pode ser observada na Tabela 3.4,

Tabela 3.1 – Fluxo veicular

	Via 1	Via 4	Via 5	Via 6
Veículos/hora	875	1350	1583	1000

As vias internas são formadas pelas seguintes proporções de conversão,

Tabela 3.2 – Proporção de conversão

Via Origem	Via Destino	Conversão veicular
1	2	25%
4	2	75%
2	3	87%
5	3	30%

3.4.1 Validação do modelo de tráfego

Para a validação do modelo de tráfego são analisados os perfis de fluxo cíclicos de cada via. O primeiro perfil sempre corresponderá ao TRANSYT, seguido do perfil obtido com o modelo desenvolvido.

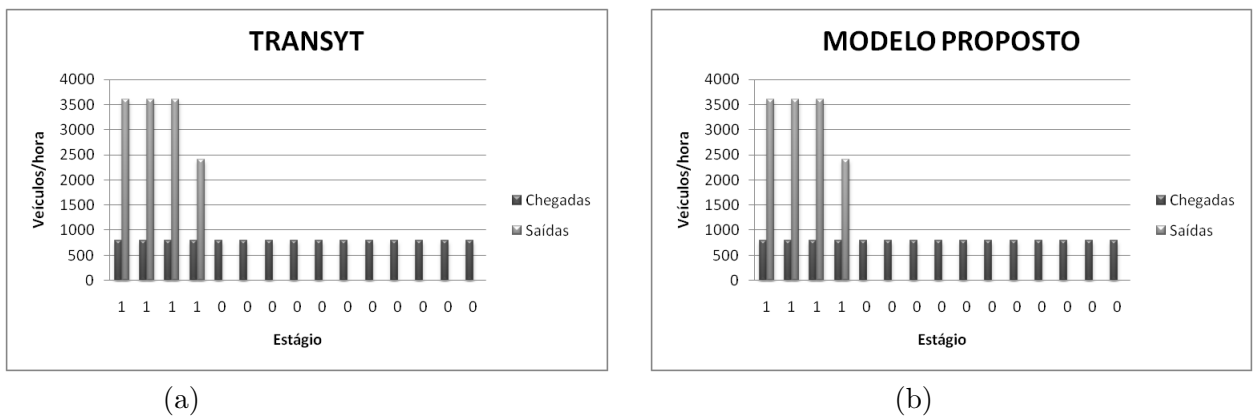


Figura 3.4 – Comparação entre modelos via 1.

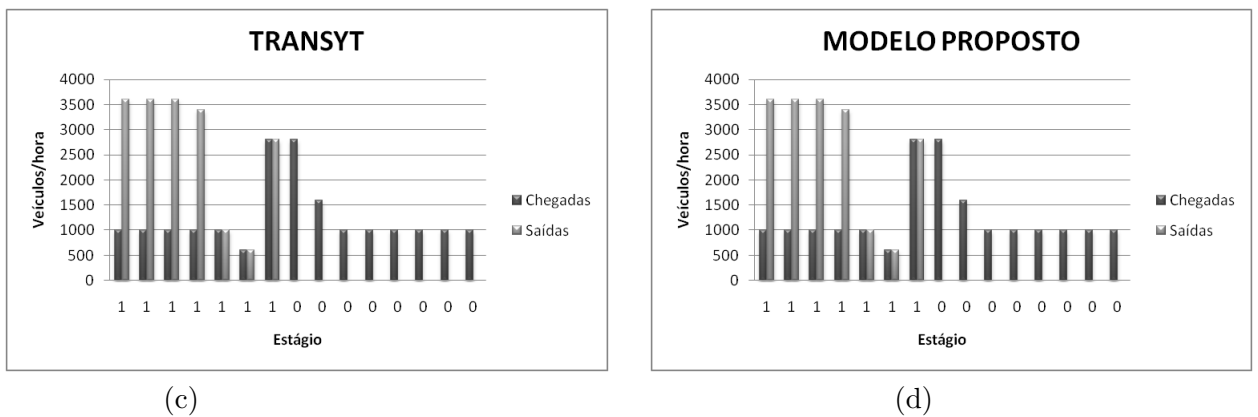
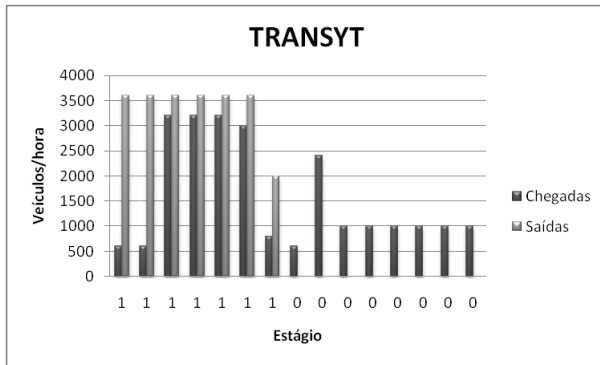
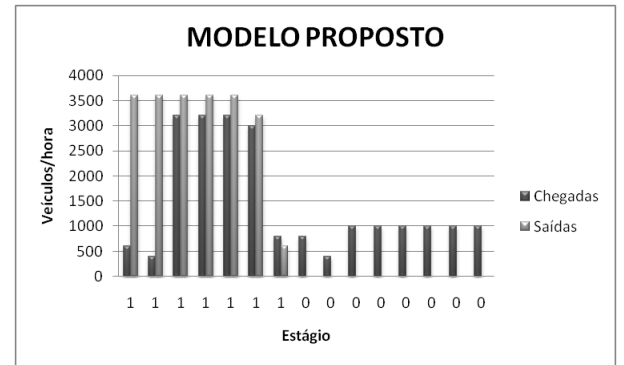


Figura 3.5 – Comparação entre modelos via 2.

As Figuras de 3.4 a 3.9 auxiliam a comparação entre os modelos de tráfego. Nelas são apresentadas as chegadas durante o tempo de vermelho e as chegadas e saídas durante o tempo de verde. Pode-se verificar que o perfil de chegadas e saídas são coincidentes, ou seja, mesmo não tendo conhecimento dos detalhes de implementação do TRANSYT, seus resultados foram reproduzidos. Para tanto, foi desconsiderada a dispersão de pelotão, os tempos de amarelo, e qualquer otimização, seja de ciclo, defasagem ou tempo de verde. Nas

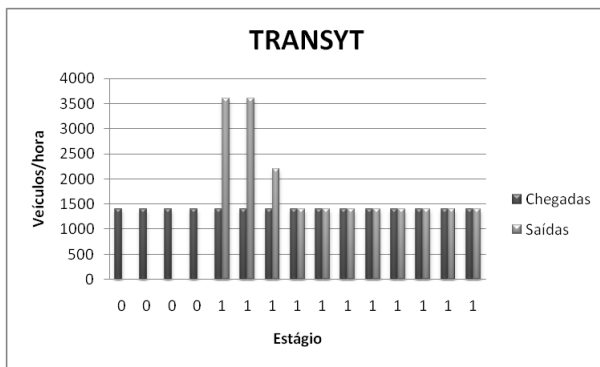


(e)

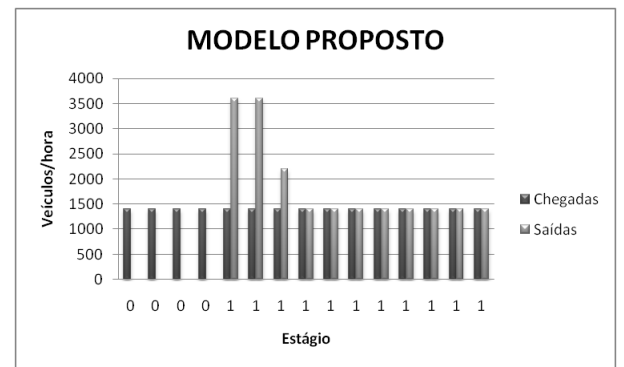


(f)

Figura 3.6 – Comparação entre modelos via 3.

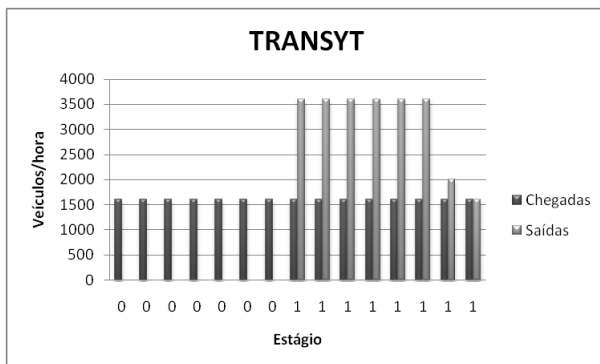


(g)

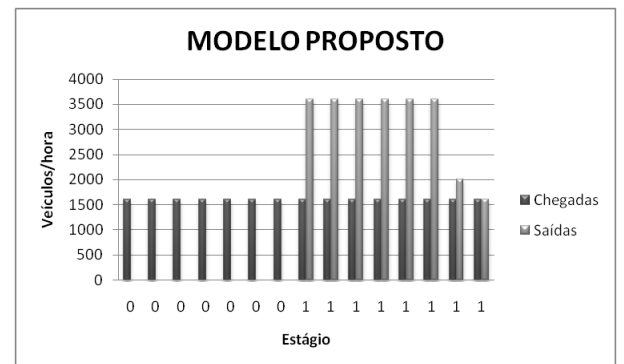


(h)

Figura 3.7 – Comparação entre modelos via 4.



(i)



(j)

Figura 3.8 – Comparação entre modelos via 5.

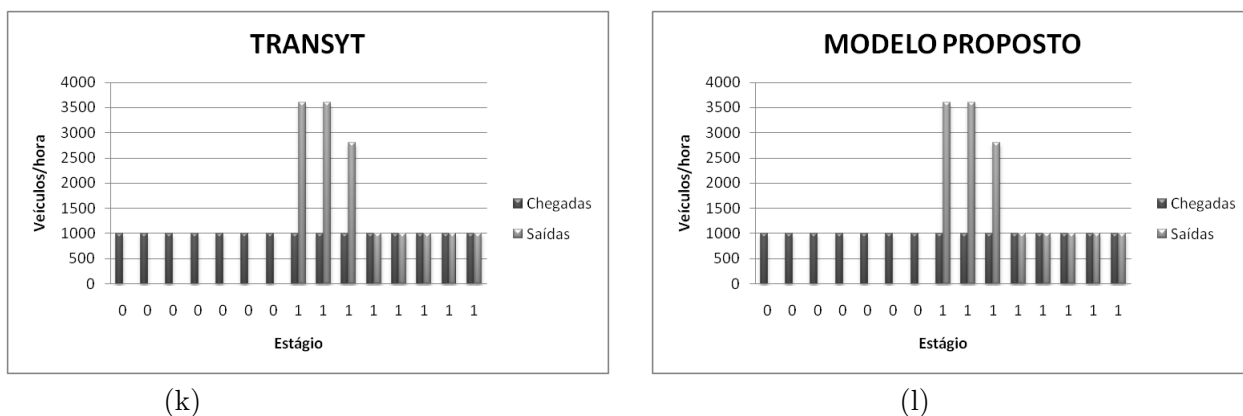


Figura 3.9 – Comparação entre modelos via 6.

Tabela 3.3 – Comparação de desempenho

Interseção	TRANSYT	ATEFI	ATESA	ATERE
1	6,5	6,7	6,8	8,4
2	11,1	8,3	9,7	12,5
3	7,1	6,2	8,5	6,4

vias internas, que recebem a composição de fluxo das vias externas, ocorreu uma pequena diferença na composição dos mesmos. Em exemplos de fluxo equilibrado, este comportamento não ocorreu. Como a situação apresentada reflete uma composição real de fluxo, onde a demanda é desequilibrada, tanto em proporções de conversão quanto em níveis de entrada.

3.4.2 Avaliação de desempenho

O desempenho de uma rede de tráfego pode ser avaliado através do Índice de Desempenho (ID) das interseções. Como visto anteriormente, nos algoritmos desenvolvidos este índice é obtido pelo atraso nas vias. A Tabela 3.3 apresenta o valor médio do atraso, ou seja, o total das filas por interseção pelo tempo total de simulação.

A avaliação destes resultados permite verificar que os valores de atraso obtidos diretamente do TRANSYT são próximos aos valores obtidos nos outros três algoritmos. Este resultado é esperado, pois para uma configuração conhecida de chegada veicular o TRANSYT deve apresentar a melhor configuração otimizada de forma a minimizar o atraso veicular. As diferenças verificadas devem-se aos diferenciados métodos de otimização. Também, para uma aplicação prática o desempenho computacional e o custo de cada estratégia deveriam ser considerados. A estratégia em tempo fixo, como o TRANSYT e ATEFI, devem ser aplicados às redes de média e grandes cidades que não apresentam grandes variações de demanda no decorrer de períodos maiores do que a disponibilidade de atualização dos dados de contagem veicular. Já as estratégias como o ATESA e ATERE, adequam-se melhor às malhas de grandes cidades com grande variação de demanda, mesmo que seu custo de implantação e manutenção sejam maiores.

3.5 Conclusões

A avaliação dos resultados permite concluir que os algoritmos desenvolvidos são satisfatórios. Primeiramente, a avaliação do perfil de fluxo cíclico garante que o modelo de tráfego está de acordo com o modelo da estratégia TRANSYT, permitindo assim, a representatividade do comportamento viário.

Proporcionalmente os resultados dos três algoritmos e do TRANSYT, são próximos. Tais resultados devem ser avaliados ainda quanto ao tempo computacional para obtenção dos tempos otimizados, quanto a coordenação de pelotões e a descarga de filas. Também uma etapa que de fato valida tais resultados é aplicar cada algoritmo em um microsimulador e verificar seu desempenho em condições reais, ou seja, considerando dispersão, velocidade e tamanho variável dos veículos.

Referências

- [34] ROBERTSON, D. I. TRANSYT: A traffic network study tool. In: ROAD RESEARCH LABORATORY. Crowthorne, England, 1968.
- [35] LITTLE, J. D. C.; KELSON, M. D.; GARTNER, N. H. MAXBAND: A program for setting signals on arteries and triangular networks. *Transportation Research Record*, v. 795, p. 40–46, 1981.
- [36] HAENEL, C. J.; MESSER, H. E.; KOEPPE, E. *A Report on the User's Manual for Progression Analysis and Signal Systems Evaluation Routine - PASSER II*. [S.l.], August 1974.
- [37] PAPAGEORGIOU, M. et al. Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, v. 91, n. 12, p. 2043–2067, 2003.
- [38] BRETHERTON, D. The SCOOT urban traffic control system. *Traffic Advisory Leaflet*, v. 7/99, April 1999.
- [39] LOWRIE, P. *SCATS: A traffic responsive method for controlling urban traffic*. Sidney: NSW, 1990.
- [40] GARTNER, N. H. OPAC: A demand responsive strategy for traffic signal control. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD. [S.l.], 1983. v. 906, p. 75–81.
- [41] FARGES, J. L.; KAMDEM, I.; LESORT, J. B. Realization and test of a prototype for real time urban traffic control. In: . [S.l.]: Drive Project V1022, 1991.
- [42] MIRCHANDANI, P.; HEAD, L. Rhodes: A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research – Part C*, New York, v. 8, p. 105–114, 2001.

-
- [43] PORCHE, I. et al. A decentralized scheme for real-time optimization of traffic signals. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS. International Conference on Control Application, Dearbon, 1996. p. 582–589.
- [44] BOILLOT, F. Evaluation of the real time urban traffic control algorithm CRONOS: first phase. In: IN PROC. 7TH IFAC/IFORS SYMPOSIUM ON TRANSPORTATION. Tianjin, China, 1994. p. 585–590.
- [45] MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. B. *How To Solve It: Modern Heuristics*. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [46] HUNT, P. B.; ROBERTSON, D. L.; BRETHERTON, R. D. The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Eng. Control*, v. 23, p. 190–192, 1982.
- [47] PORCHE, I.; LAFORTUNE, S. Adaptive look-ahead optimization of traffic signals. 1997.
- [48] CARLSON, R. C. Implementação de algoritmo para controle em tempo real de tráfego urbano. Projeto de Fim de Curso. Março 2004.

Conclusão

As condições atuais do tráfego urbano tem preocupado instituições públicas e privadas. O tempo perdido pelos condutores de veículos nas vias deve ser minimizado. Muitos são os aspectos a serem considerados: investimentos em transporte público, planejamento de utilização do solo (vias, estacionamentos, etc.), ajuste semafórico, entre outros. Os algoritmos ATEFI, ATESA e ATERE apresentam metodologias de ajuste semafórico de forma a minimizar o atraso veicular, garantindo maior fluidez em vias não saturadas.

Foi apresentado o modelo de tráfego básico, comum aos três algoritmos, e este validado através de comparação com o TRANSYT/10. Esta validação foi realizada pela reprodutividade dos resultados quando comparados os histogramas gerados pelo TRANSYT, do comportamento do tráfego durante um ciclo, com o modelo desenvolvido. Para ser possível a comparação, foi considerado o modelo sem dispersão e otimização.

Posteriormente nos três algoritmos desenvolvidos, foram aplicadas diferentes metodologias de otimização. Estas foram baseadas em estratégias já consagradas comercialmente, ou seja, TRANSYT, SCOOT e PRODYN.

Os três algoritmos estudados e desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Gerenciamento de Tráfego Urbano da Universidade Estadual de Londrina, foram testados com dados de uma sub-rede da malha viária central de Londrina, apresentando desempenho satisfatório. Melhorias devem ser realizadas quanto a coordenação de pelotões e a consideração de dispersão nas vias.

Estão sendo desenvolvidos trabalhos complementares aos algoritmos. Buscando garantir uma plataforma amigável, onde os diferentes algoritmos possam ser aplicados, vem sendo desenvolvida uma interface gráfica. Também estudos quanto à detecção veicular e seu tratamento de sinais estão em andamento. O desenvolvimento de um controlador semafórico virtual como instrumento de treinamento é outra etapa de trabalho deste grupo de pesquisa.