

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA AO
CONTROLE DO CONGESTIONAMENTO DE
TRÁFEGO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

KAREN FARFÁN CAMPANA

Florianópolis, Julho de 2000.

PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA AO CONTROLE DO CONGESTIONAMENTO DE TRÁFEGO

Karen Farfán Campana

‘Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle e Automação*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



Werner Kraus Júnior, Dr.
Orientador

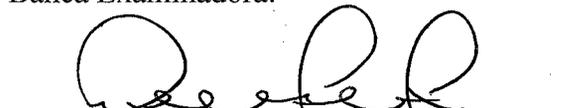


José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. d'Etat.
Co-orientador



Ildemar Cassana Decker, D. Sc.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

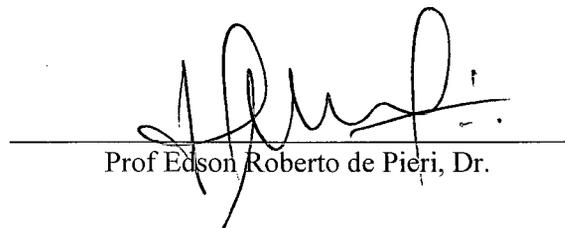
Banca Examinadora:



Prof. Werner Kraus Junior, Dr.
Orientador



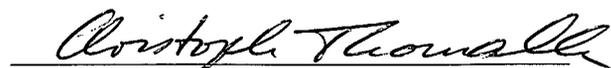
Prof. José Eduardo Ribeiro Cury, Dr. d'Etat.
Co-orientador



Prof. Edson Roberto de Pieri, Dr.



Prof. Lenise Grando Goldner, Dr. Sc.



Prof. Christoph Thomalla, Dr.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria agradecer a meus pais, Juan de Dios Farfán Mendoza e Doris Campaña Villalobos, e minhas irmãs Tatiana e Liliana, por todo o amor, apoio e compreensão; não só durante minha estada no Brasil como ao longo de minha vida.

A meu orientador Werner Kraus, pela paciência e bom humor que sempre demonstrou ao longo desta dissertação, assim como pelo apoio nas diferentes formas que tive por parte dele para finalizar esta dissertação.

A todas as pessoas com que compartilhei minha estada no Brasil, que fizeram a diferença de sentir-me como em casa. As meninas de meu apartamento, Cinthia (sisi) pelos cuidados, mimos e brigas pela limpeza do apartamento, Rosa (flor) pelos papos até altas horas da noite, em que não a deixei dormir, a Fernanda, Dayana, Guiliana. Aos amigos com que compartilhei coisas boas, muito boas e diferentes, ao Mario, Pudim, Júlio, Pedrão, Rafael, Totonho e muitos outros que não menciono.

Aos professores, colegas e amigos do laboratório do LCMI, por todos os momentos compartilhados, em especial ao Marcos Vallim, Fábio Benvenuti, Felipe Beck, Karina Barbosa, César Torrico, Hallthmann dos Reis, Michelle Wingham, Javier Triveño, Elmer Llanos, Cris Paim, Antonio Carrillo, Jerusa Marchi, Sonia Palomino, Alex Keller.

A Fernando Passold por todo o amor, compreensão e apoio, e por compartilhar comigo todas as loucuras que a gente inventa.*

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

PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA AO CONTROLE DO CONGESTIONAMENTO DE TRÁFEGO

Karen Farfán Campana

Julho/2000

Orientador: Werner Kraus Júnior, Dr.
Co-orientador: José Eduardo Ribeiro Cury, Dr.
Palavras-chave: Engenharia de Tráfego, Otimização, Programação linear.
Número de Páginas: 67.

Este trabalho estuda o controle de tráfego urbano em redes congestionadas, e baseia-se em um método de controle ótimo de sinais de tráfego em condições de saturação. Desenvolvido por Eddelbüttel e Cremer (1994), este método é baseado na limitação do ingresso de fluxo veicular numa malha viária de forma que não se violem as restrições de capacidade das vias internas desta malha. Um esquema iterativo é usado para ajustar os resultados de um Programa Linear (PL) de tal forma que este resultado satisfaça os conflitos e fluxos de saturação da malha viária. O algoritmo possui, dentre outras, duas importantes propriedades: (i) ele leva em conta que a solução do PL afeta, devido aos novos tempos de verde, a composição dos fluxos internos e (ii) permite trabalhar com filas previamente formadas, refletindo de forma mais realista condições de tráfego em uma interseção semaforizada.

O principal objetivo do trabalho é apresentar o método, assim como sua implementação e os resultados obtidos por simulação, para um conjunto de interseções localizadas numa das entradas do campus universitário da UFSC (entroncamento Av. Beira-Mar/Córrego Grande/Entrada leste do campus). Atualmente, esta pequena malha de semáforos não trabalha prevendo otimização da coordenação de sinais, usando apenas tempos fixos iguais cujos valores variam conforme o horário do dia, criando dificuldades em horários de congestionamento. Os resultados de simulação mostram que uma melhor gerência das filas formadas durante os horários de pico pode ser obtida com o uso do método de PL.

Abstract of the Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

LINEAR PROGRAMMING APLIED TO TRAFFIC CONTROL OF CONGESTED NETWORKS

Karen Farfán Campana

July/2000

Advisor: Werner Kraus Junior, Dr.
Co-advisor: José Eduardo Ribeiro Cury, Dr.
Keywords: Traffic Engineering, Optimization, Linear Programming
Number of Pages: 67

The use of an optimal-control strategy for saturated conditions in urban traffic networks is studied. The method adopted was developed by Eddelbüttel and Cremer (1994). It works by limiting the vehicular flow entering the network such that capacity restrictions for the queues formed within the network are not violated. An iterative scheme is used for adjusting the outcome of a Linear Program (LP) aiming at satisfying the conflicts and saturation flows within the network. The algorithm possesses two properties: (i) it takes into account that the LP solution affects, through the computed new green times, the composition of internal flows in terms of their turning rates and (ii) standing queues at the beginning of the control period are properly handled.

The aim is to present the method together with its implementation in simulation, applied to a network of intersections located at one of the entrances of the UFSC campus. Currently, this network operates on a fixed-plan schedule that is not optimized for maximum capacity (nor for performance in non-saturated conditions, for that matter), which brings difficulties in peak-hour traffic conditions. Simulation results show that a better management of the queues for non-blockage of the intersections can be obtained with the PL method.

sumário

Capítulo 1	Introdução	1
Capítulo 2	Tráfego Urbano: Revisão dos Conceitos e Problemas Básicos	4
2.1	Introdução	4
2.2	Problemas do Tráfego urbano	4
2.2.1	Congestionamento em vias urbanas	4
2.2.2	Congestionamento em rodovias	6
2.3	Elementos de controle de tráfego	8
2.4	Interseções sinalizadas	9
2.5	Fluxo de saturação	13
2.6	Desempenho	15
2.7	Conclusão	17
Capítulo 3	Controle Semafórico em Redes Viárias	18
3.1	Introdução	18
3.2	Administração e controle de operações no sistema de transporte	19
3.3	Controle <i>off-line</i>	21
3.3.1	Princípios gerais	22
3.3.2	<i>Transyt</i>	24
3.4	Controle <i>on-line</i>	23
3.4.1	Primeira geração	27
3.4.2	Segunda geração	28
3.4.3	Terceira geração	29
3.5	Congestionamento em redes urbanas	31
3.6	Conclusão	33
Capítulo 4	Otimização em Redes Urbanas Saturadas	34
4.1	Introdução	34

4.2	Problemas com o <i>Transyt</i>	35
4.3	Procedimento de otimização adotado para o controle de redes congestionadas	36
4.4.	Determinação do tempo de ciclo nas interseções críticas	38
4.5	Formulação do modelo da rede usando programação linear.....	39
4.5.1	Interdependência entre filas e controle de interseções.....	42
4.5.2	Modelagem das restrições devido a conflitos	42
4.5.3	Cálculo dos tempos de verde	44
4.6	Conclusão.....	45
Capítulo 5	Estudo de Caso	46
5.1	Introdução	46
5.2	Características da interseção	46
5.3.	Modelagem da malha viária segundo modelo de otimização	48
5.3.1	Dados do problema	49
5.4.	Arranjo físico básico do cruzamento	50
5.4.1	Chegada dos veículos.....	51
5.4.2	Formação de fila numa via.....	52
5.4.3	Modelagem das restrições devido a conflitos	53
5.5	Ferramenta de implementação e metodologia	56
5.6	Resultados obtidos	56
5.7	Comparação com a temporização atual	60
5.8	Conclusão.....	64
Capítulo 6	Conclusão e Perspectivas	66
	Referencias Bibliográficas	68

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os problemas associados com o tráfego veicular movimentando-se através de uma rede viária numa cidade são numerosos. A situação se agrava durante horários de pico, os quais mesmo se não forem de longa duração, acarretam conseqüências significativas no fluxo de tráfego. Neste ponto, além de atrasos e demoras, aparece um novo conjunto de problemas a tratar: a deterioração da capacidade da interseção. Eventualmente, filas podem se formar provocando uma diminuição progressiva da capacidade da rede, resultado do bloqueio das interseções vizinhas ao gargalo de tráfego.

Sinais de tráfego são usadas por serem uma das maneiras mais eficazes de resolver os conflitos dos movimentos de tráfego (tanto pedestre como veicular). Assim o uso eficiente destas sinais se torna decisivo em condições de congestionamento. Nesta situação, procura-se minimizar atrasos, filas, número de paradas, energia consumida e o impacto ao meio ambiente através da maximização da capacidade das interseções. Apenas do ponto de vista econômico, a solução para o problema do congestionamento representa recursos vultosos poupados a cada ano para a economia do país.

Em vias urbanas, onde o espaço entre interseções adjacentes é comparativamente pequeno, o melhor desempenho operacional das interseções com sinais controladas pode, freqüentemente, ser obtido tomando-se em consideração a interação entre interseções adjacentes para a determinação da composição dos sinais. Tal coordenação entre interseções sobre uma área é chamada de controle de tráfego por área (WONG,1995).

A busca pela coordenação dos sinais de tráfego de uma área determinada através do uso de controladores computadorizados iniciou-se na década do 60, dando origem ao que agora é conhecido como sistemas de Controle de Tráfego Urbano (CTU). Entre as vantagens obtidas com a implantação de sistemas CTU pode-se mencionar: redução de

acidentes de trânsito, redução dos atrasos e número de paradas, com reflexos na economia de combustível e na diminuição da poluição, e economias importantes de tempo e pessoal no ajuste dos planos semaforicos (HUNT *et al*, 1981).

Notáveis avanços vêm se dando desde a introdução dos microprocessadores. A sofisticação e a capacidade dos instrumentos disponíveis para o controle de tráfego alcançou níveis surpreendentes. Nos anos recentes, com o desenvolvimento da teoria de fluxo de tráfego, um significativo número de modelos matemáticos foi desenvolvido na tentativa de prever o comportamento do tráfego. Estes modelos de simulação de tráfego permitem não só estudar uma situação existente de forma barata e cômoda mas também soluções alternativas para problemas atuais, além de permitir a previsão de situações futuras.

Dentre os diversos *softwares* para engenharia de tráfego a utilização do programa *Transyt* para a geração de planos semaforicos está se tornando cada vez mais freqüente no Brasil (Ribeiro, 1996), sendo usada tanto como uma ferramenta de planejamento como de simulação. No *Transyt*, o comportamento dos veículos individuais é substituído por relações determinísticas que representam o comportamento agregado do tráfego. Isto não garante o ótimo global, mas busca uma boa solução tomando em conta muitos parâmetros. Apesar do uso intensivo do *Transyt*, este não é apropriado em situações de congestionamento, o que limita significativamente sua aplicabilidade.

Este trabalho de dissertação trata do estudo e implementação de um modelo matemático de otimização, cuja abordagem se focaliza numa estratégia de controle ótimo para redes congestionadas. A flexibilidade do algoritmo para refletir de uma forma mais real as diferentes situações que se apresentam numa rede urbana foi um fator decisivo para sua implementação.

Considerou-se como problema de estudo a interseção localizada na entrada do campus universitário da UFSC, a "Rótula de Dona Benta". Atualmente esse trecho da malha viária opera em planos de tempo fixo, os quais não estão bem adaptados para lidar com os horários pico. O estudo do *Transyt* foi intensivo numa primeira etapa deste

trabalho para o estudo do comportamento da rótula, e a exploração dos conceitos e metodologias que abrangia seu uso. A modelagem, nesta primeira etapa, foi feita em diferentes horários do dia simulando o comportamento atual, e otimizando os mesmos. Após o domínio deste *software*, ficaram claras suas limitações para tratar situações de congestionamento. Isto motivou o estudo de algoritmos alternativos para os horários de pico, tendo se optado por um algoritmo baseado em Programação Linear para o estudo dos problemas que acarretam o congestionamento de tráfego.

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

Capítulo 2: Introduce a problemática do congestionamento, identificando as diversas etapas que caracterizam o fluxo veicular, assim como um apanhado de vários tópicos relacionados a controle de tráfego, capacidade, desempenho, variáveis de controle entre outras.

Capítulo 3: Apresenta conceitos e métodos de controle, desde o ponto de vista administrativo e de tarefas. Definem-se as categorias de controle *on-line* e *off line*, e se discutem diferentes ferramentas de software, simulação e algoritmos de otimização.

Capítulo 4: Apresenta-se o modelo matemático adotado para uso com Programação Linear, com a formulação das restrições para filas e movimentos em conflito em uma rede urbana congestionada, assim como as etapas do processo de otimização.

Capítulo 5: Apresenta a modelagem e implementação do modelo no problema de estudo, assim como uma análise comparativo dos resultados obtidos com aqueles que atualmente funcionam.

Capítulo 6: São apresentadas conclusões do trabalho realizado, estado atual da pesquisa e perspectivas futuras.

CAPÍTULO 2

TRÁFEGO URBANO: REVISÃO DOS CONCEITOS E

PROBLEMAS BÁSICOS

2.1 Introdução

A crescente importância do gerenciamento do tráfego nos grandes centros urbanos, tendo em conta as dificuldades de compatibilização da infra-estrutura viária com o fluxo crescente de veículos, é apresentada neste capítulo. Serão abordados brevemente alguns dos elementos usados para o controle de tráfego e as técnicas para o diagnóstico do congestionamento em áreas urbanas que permitem uma completa caracterização do congestionamento, assim como alguns dos aspectos envolvidos na montagem da solução para problemas de controle de tráfego.

2.2 Problemas do tráfego urbano

Um fluxo veicular é chamado de *fluxo ininterrupto* quando este é contínuo por longos períodos de tempo como, por exemplo, o fluxo veicular nas rodovias (*freeway*). Já nas áreas urbanas o fluxo veicular é chamado de *fluxo interrompido*, devido às interrupções do fluxo veicular originadas pelos semáforos ou outros controladores de tráfego, para poder dar passe aos outros fluxos de veículos que compartilham as mesmas vias de percurso.

2.2.1 Congestionamento em vias urbanas

Uma das principais situações que definem o congestionamento do tráfego numa rede urbana, é aquela em que o veículo localizado numa interseção tem de esperar mais de

um ciclo para poder ser atendido. Esta situação leva a uma diminuição significativa na eficiência da rede viária e na velocidade de percurso dos veículos. O desempenho das vias de fluxo interrompido é obtido principalmente pela relação demanda / capacidade através do grau de saturação, definido como a relação entre o número médio de veículos que chegam ao cruzamento e o número máximo de veículos que podem ser atendidos.

MAGALHÃES (1998) destaca três técnicas entre as principais para o diagnóstico do congestionamento em áreas urbanas:

- *determinação do grau de saturação;*
- *pesquisa de velocidade utilizando veículo-teste;*
- *pesquisa de formação de filas.*

Os resultados das aplicações dessas técnicas são complementares e, juntos, permitem uma completa caracterização do congestionamento, conforme será exposto a seguir.

O grau de saturação conforme visto acima, é definido pela relação percentual entre a demanda de tráfego e a capacidade da aproximação de um cruzamento semaforizado. Caso seja superior a 100%, indica uma utilização plena da capacidade daquela aproximação e que conseqüentemente qualquer veículo terá que esperar mais um ciclo para atravessar o cruzamento. Entretanto, o uso somente desta técnica não permite distinguir as diferentes tipos de congestionamentos.

A pesquisa de velocidade, utilizando veículo-teste, visa determinar o número médio de paradas e o tempo médio de espera em filas ao longo de rotas preestabelecidas. Embora seus resultados possam evidenciar situações de congestionamento, não se pode determinar a área de abrangência, tempo de duração nem conhecer suas possíveis causas.

Já a pesquisa de formação de filas, embora não forneça alguns dos elementos que a técnica anterior apresenta, tais como o tempo médio de espera de cada veículo, é a única

que permite distinguir os diferentes níveis de congestionamento assim como o tempo de duração total e possíveis causas, além da área de abrangência. O uso de filmagens é fundamental para que se possa rever posteriormente a situação pesquisada e possibilitar uma melhor compreensão das causas e dos efeitos do congestionamento. Conforme afirma TAYLOR (1996), a gravação em vídeo fornece uma “história” completa dos movimentos de tráfego que estão sendo observados.

2.2.2 Congestionamento em rodovias

Em vias de fluxo ininterrupto (rodovias), o desempenho das vias é obtido principalmente pela relação volume / capacidade, através dos níveis de serviço. Os níveis de serviço são 6 – A, B, C, D, E, F sendo que as condições de fluidez pioram a medida que os níveis de serviço vão de A até F, sendo F a representação do total congestionamento da via. A Figura 2.1 descreve as relações entre as três variáveis macroscópicas básicas do fluxo veicular sob condições de fluxo estacionário (GAZIZ, 1974):

- *volume do tráfego*, x_c (número de veículos por hora, por via);
- *velocidade do fluxo de tráfego*, x_s (em quilômetros por hora);
- *densidade do tráfego*, x_d (número de veículos por quilômetro, por via).

Na Figura 2.1, pode-se distinguir os diferentes níveis de serviço do fluxo veicular à medida que aumenta a densidade do tráfego, x_d .

Os diferentes níveis de serviço indicados pelos pontos A à F são descritos a seguir.

- *nível de serviço A*: fluxo de tráfego liberado, não existe interação entre os veículos (ou fluxo de tráfego contínuo);
- *nível de serviço B*: a interação entre veículos reduz ligeiramente a velocidade do fluxo veicular, e o volume do tráfego se encontra perto do limite da capacidade da via;

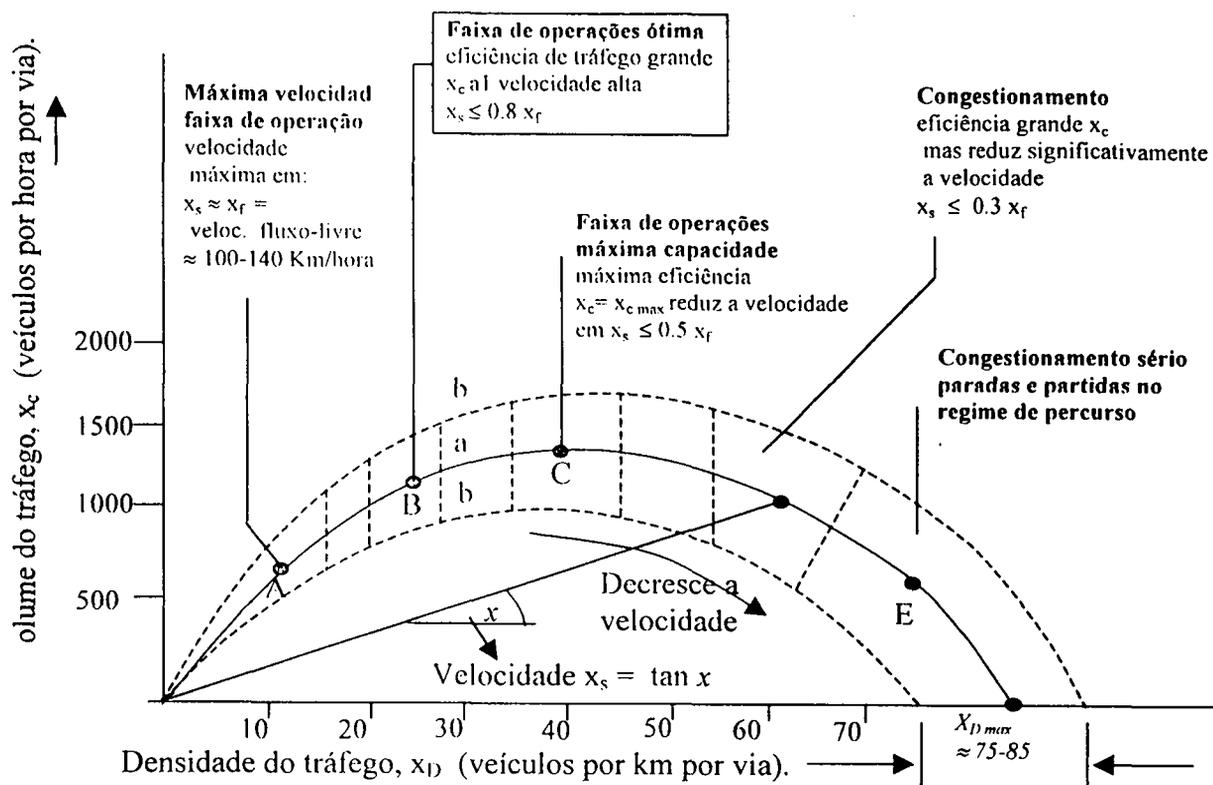


Figura 2.1. Diagrama fundamental do fluxo de tráfego estacionário
(adaptado de STROBEL, 1982).

- *nível de serviço C*: a operação se encontra no limite da capacidade da via;
- *nível de serviço D*: congestionamento; diminui significativamente a velocidade do fluxo veicular, reduz-se a eficiência do tráfego (comparado com estado C), e aumenta a sensibilidade a pequenos distúrbios;
- *nível de serviço E*: congestionamento crítico, repetidas paradas e partidas, regime caracterizado por freqüentes alterações entre manobras de aceleração e desaceleração, incluindo paradas curtas do tempo;
- *nível de serviço F*: tráfego totalmente colapsado, aproximando-se a zero tanto a velocidade quanto a eficiência do tráfego, já que a densidade alcança o ápice da concentração crítica. ($x_{D \max}$).

Como se pode observar, a importância de encontrar meios de manter o fluxo de tráfego próximo do estado ótimo isto é próximo dos pontos B e C (nas rodovias), se torna vital a medida que aumenta a densidade do fluxo veicular fora desses valores ocorre uma grande perda da capacidade física das vias. Já em redes urbanas o uso eficiente dos diferentes elementos de controle de tráfego se torna vital em horários de pico, em que o ordenamento do tráfego ajuda a maximizar a capacidade da rede viária.

2.3 Elementos de controle de tráfego

Utilizados tipicamente para desempenhar atividades de monitoração, controle e atuação, os elementos de controle podem ser integrados em sistemas eficazes para ordenar o atendimento à demanda de utilização de uma rede viária urbana. Atualmente existem vários elementos de controle aplicáveis ao tráfego disponíveis comercialmente. Dentre eles pode-se destacar controladores eletrônicos de sinais de tráfego, redes de comunicação, detectores de veículos (sensores) e atuadores.(ZANUZ, 1997), como pode ser visualizado na Figura 2.2.

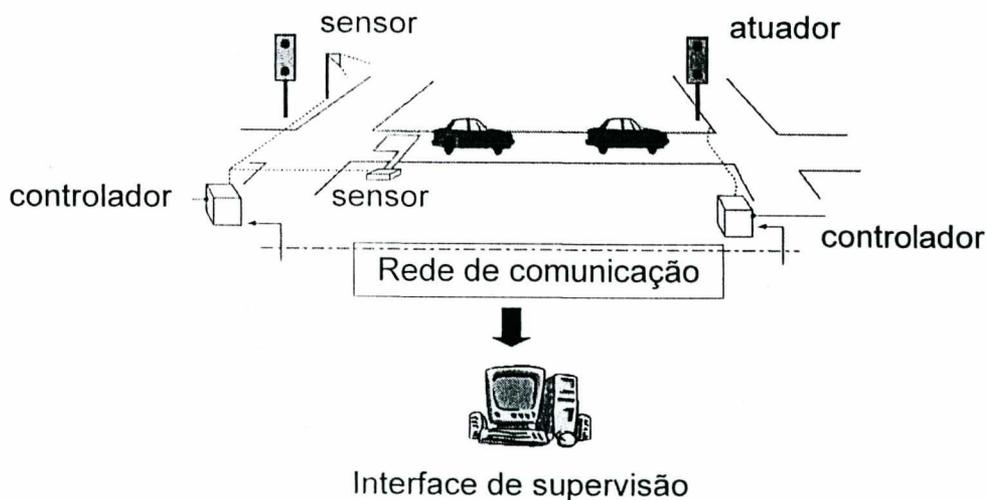


Figura 2.2 Elementos de Controle de Tráfego

Controladores eletrônicos de sinais luminosos realizam o controle de semáforos em interseções, podendo ser conectados em rede e integrados a uma central. Eles permitem a

programação de um determinado número de planos que podem ser alternados no decorrer do dia .

Entre as diversas tecnologias de detecção de veículos, a detecção de veículos está baseada predominantemente em detetores de laço indutivo (ILD – *Inductive Loop Detectors*) instalados abaixo da superfície das vias. Além desses, outros detetores que utilizam tecnologias alternativas como o uso de radares de microondas ou processamento de imagens estão sendo desenvolvidos (ZANUZ, 1997).

Atuadores são todos os elementos capazes de interferir no comportamento do fluxo veicular. Os mais evidentes são os sinais luminosos, ou semáforos (como serão tratados no trabalho), sendo utilizados tipicamente em interseções e trechos da via destinados à travessia de pedestres. Outro exemplo são os sinais variáveis de mensagens (VMS - *Variable Message Signs*) que, entre outras utilidades, podem fornecer informações aos motoristas a respeito das condições atuais de determinadas rotas.

As análises sobre sistemas de tráfego são realizadas, na maioria das vezes, sobre as características dos elementos que os compõem, ou seja, sobre características físicas e operacionais das vias, interseções, assim como sobre o próprio movimento. Entretanto, no contexto urbano algumas peculiaridades devem ser consideradas, já que muitos problemas surgem oriundos da elevada demanda por transporte em áreas concentradas. Medidas para aumentar a capacidade de serviço da rede viária nas cidades envolvem barreiras físicas e econômicas substanciais. Os dispositivos de controle de tráfego desempenham um papel fundamental no escopo das atividades de gerência do comportamento do sistema como um todo.

2.4 Interseções sinalizadas

O objetivo do sistema de semáforos do trânsito, é separar no tempo os conjuntos de movimentos conflitantes. Um conjunto de movimentos está em conflito se os fluxos neste conjunto não podem ser realizados simultaneamente. Uma das primeiras tarefas que deve

ser realizada no projeto de um cruzamento sinalizado é identificar os conjuntos apropriados de movimentos de forma que todos os movimentos possam ser contemplados em algum intervalo de tempo (MASCARENHAS, 1998). Cada um destes intervalos é chamado de *fase*.

As fases se alternam ao longo do tempo de forma cíclica. Assim, o tempo necessário para que todos os conjuntos de movimentos sejam contemplados numa interseção é chamado de *ciclo*. Um ciclo é dividido em tempo de amarelo, tempo vermelho, e tempo de verde. O tempo de amarelo é usado para alertar aos motoristas e pedestres de que haverá uma troca de sinal. O tempo de verde é o tempo durante o qual a luz verde de um semáforo fica acesa. O tempo total efetivamente aproveitado pelos veículos, em outras palavras, a duração do tempo que efetivamente os motoristas se deslocam através da interseção é chamado de tempo de verde efetivo, o qual é avaliado como sendo a soma do tempo de verde e amarelo menos o tempo perdido no início do verde (devido à inércia no arranque da fila). O tempo de vermelho é o tempo em que os motoristas não tem direito a passagem; o intervalo de tempo em que efetivamente os motoristas não circulam é conhecido como tempo efetivo vermelho. Ainda existem casos em que por questões de segurança, nenhum conjunto de movimentos tem o direito de passagem, situação em que a luz vermelha fica acesa em todos os semáforos, sendo conhecido esse tempo como vermelho total.

Diferentemente do amarelo e do vermelho total, que são períodos fixos definidos previamente, os períodos de tempo verde e vermelho são variáveis controláveis que podem mudar entre patamares de referência. O controle é conseqüentemente uma variável binária com dois estados verde efetivo ou vermelho efetivo. Um nível de *fairness* (“harmonia”) é conseguido geralmente através de um máximo tempo de vermelho e um mínimo tempo de verde. Por exemplo, para motoristas, o máximo tempo de vermelho é de 120 s, e para pedestres é de 60 s. Já o mínimo tempo de verde usualmente está no limite de 10 à 15 s, dependendo do fluxo de tráfego previsto (BELL, 1999).

Um movimento é compatível com outro se os fluxos simultâneos não são conflitantes. Dado que algumas vias são compatíveis ou semi compatíveis com outras, um

conjunto de vias pode ser agrupado em fases (referido também como estágios), na qual receberão verde simultaneamente. Este agrupamento permite minimizar a quantidade de fases para poder atender todos os movimentos, dando-se desta forma um melhor aproveitamento da capacidade das interseções ¹. A Figura 2.3 mostra o conjunto de movimentos permitidos numa interseção, assim como um possível sequenciamento dos mesmos em cada uma das fases (fases de 1 à 3).

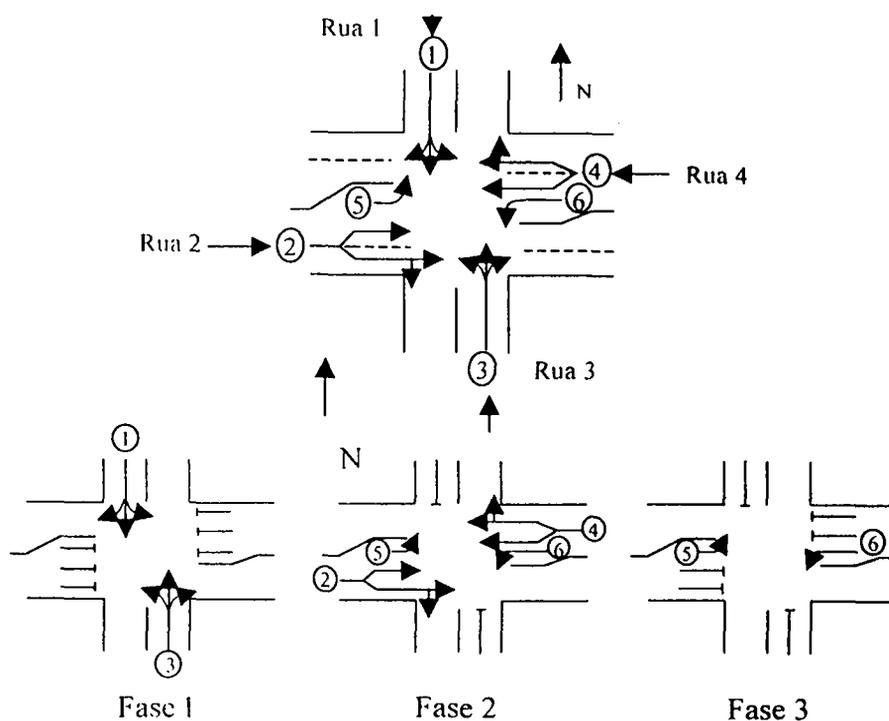


Figura 2.3 Possíveis seqüenciamento de movimentos de uma interseção em cada fase.

Fonte : YAGAR (1977)

Quando se tem mais de duas fases, a seqüência destas pode ser determinada por fatores tais como: prioridades dadas ao transporte público, necessidade de ondas verdes², atendimento a pedestres e ciclistas numa interseção, e a necessidade de vias que tem forte demanda de tráfego de receber verde em mais de uma fase (vias com muito fluxo veicular, durante o mesmo ciclo).

¹ A mudança de uma fase a outra perde-se um tempo, durante o qual a interseção não é utilizada.

² Uma onda verde é a assinatura num conjunto de interseções do tempo de verde de forma sequencial, de forma que os motoristas não parem

Os períodos de tempo em que as vias agrupadas (conjuntos de movimentos não conflitantes) perdem ou ganham direito de passagem é referenciado numa estrutura de transição de fases. O tempo entre o final de uma fase e o início da próxima é chamado de período de vermelho total, podendo ser este tempo determinado pelo máximo tempo de esvaziamento da interseção.

O recente desenvolvimento da tecnologia de controle com microprocessadores para interseções com sinais controlados, fornece um alto grau de flexibilidade para a especificação da programação de sinais de tráfego. Um recente método que toma todas as vantagens desta flexibilidade para controlar independentemente cada grupo de sinais de uma interseção é chamada de técnica baseada em grupos (*group-based*) (WONG, 1996).

Nesta técnica, o conjunto de movimentos não conflitantes de tráfego e de pedestres são referenciados como grupos de sinais. A alocação dos tempos de verde é feito diretamente, e a estrutura de transição de fases pode ser modificada para fins de controle.

Embora a metodologia baseada em grupos seja empregada para a otimização a nível de interseção com ótimos resultados, a otimização a nível de rede ainda se baseia no controle baseado em fases (*stage-based control*) (WONG, 1996). Nesta técnica as durações das fases, e possivelmente também a seqüência das mesmas, são determinadas previamente levando em consideração restrições como máximo tempo de vermelho e mínimo tempo de verde. A transição na estrutura das fases, que incorpora o vermelho total e outras restrições, não são modificadas (BELL, 1999).

Em ambos os casos, a determinação dos tempos de verde é geralmente feita em duas etapas. (i) o tempo de ciclo, que fornece o mínimo atraso, e (ii) a divisão deste ciclo dentre as diversas fases (*split*). O resultado é um plano de sinais que será aplicado na malha viária. No caso de sistemas arteriais e em rede, o *offset*³ e as políticas de coordenação também devem ser determinadas.

³ O termo *Offset*, será explorado em mais detalhes no capítulo 4.

2.5 Fluxo de saturação

É o fluxo total máximo de veículos que passa através de uma interseção (em condições operacionais). O fluxo de saturação é uma característica fundamental das vias em áreas urbanas e um importante elemento para os estudos da engenharia de tráfego. Ele pode ser definido como sendo o fluxo que seria obtido se houvesse uma fila de veículos na aproximação de um cruzamento semaforizado e a ela fossem dados 100 % de tempo de verde do cruzamento, representando escoamento ininterrupto (CAL *et al.*, 1995). Normalmente o fluxo de saturação é expresso em unidade de veículos de passageiros/hora de tempo de verde (pcu`s./h).

O fluxo de saturação pode ser influenciado por muitos fatores, tais como a composição do tráfego e a direção dos movimentos ⁴, condições prevaletentes do tempo e da visibilidade. Entretanto, é notável encontrar uma relativa constância sobre o tempo (por ex. para uma faixa reta de largura média, o fluxo de saturação pode encontrar-se na escala de 1.800 a 2.000 pcu`s /h).

Tomado como parâmetro de referência, o fluxo de saturação é usado para calcular atrasos e paradas, definir o período de tempo de verde efetivo. A Figura 2.4 representa a capacidade de uma via como a área sob a curva; G, R, A são respectivamente os tempos de verde, vermelho e amarelo e s o correspondente fluxo de saturação da interseção.

Na Figura 2.4, o tempo perdido, do início do verde ao final do amarelo (l_1+l_2) depende principalmente da geometria da malha viária como das características dos motoristas (tempo perdido na arrancada e parada dos veículos). BRANSTON (1979), sugeriu que esse valor se encontrava na escala de 3 à 5 sg.

4 A composição do tráfego se refere aos diferentes tipos de veículos que compõe a corrente de tráfego: Ex auto, ônibus, moto, caminhões etc. A direção dos movimentos refere-se as conversões à esquerda à direita e aos veículos que seguem reto.

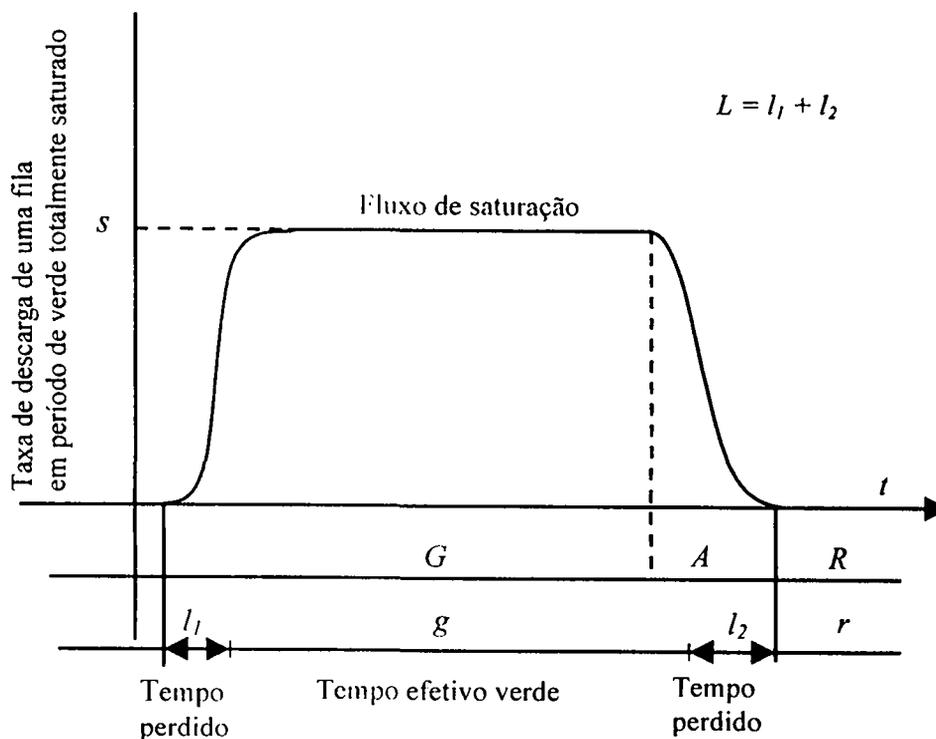


Figura 2.4 Comportamento no início e final do verde. Fonte: IMPROTA (1984)

A estabilidade de uma interseção pode ser expressa pelo grau de saturação ρ , o qual é definido por:

$$\rho = \frac{cq}{sg}$$

sendo que:

- q : o fluxo previsto de chegada de veículos;
- c : tempo de ciclo;
- s : o fluxo de saturação;
- g : o tempo de verde efetivo;

Se $\rho < 1$, se diz que a interseção é estável na média; e as filas formadas diminuirão ao final do período considerado, isto é, a interseção está sub-saturada. Se $\rho \geq 1$ a interseção é instável, isto significa que estão chegando mais veículos do que podem ser

atendidos por aquela via. Se esta situação dura muito tempo provocando o crescimento das filas, diz-se que o sistema está saturado.

2.6 Desempenho

A otimização do controle, seja *on-line* ou *off-line*, requer alguma medida de desempenho, as quais refletem diferentes aspectos na eficiência do sistema. Diversos objetivos podem querer ser alcançados, alguns deles simultaneamente como, por exemplo: minimizar o atraso, maximizar a quantidade de veículos atendidos, minimizar o comprimento das filas, minimizar o número de paradas e o consumo de gasolina. Estes múltiplos objetivos são expressados numa função, chamada de função-objetivo.

Uma medida apropriada a usar-se ao estudar os impactos do congestionamento no tempo dos usuários é o atraso, que representa a diferença entre o tempo que um veículo leva para atravessar uma dada distância e o tempo que faria se esta estivesse desobstruída. Ao avaliar a energia e as implicações das emissões de gases, por exemplo, a quantidade mais apropriada a monitorar é a quantidade de tempo gasta realmente na fila.

Tanto o atraso como o e número de paradas de uma certa via podem ser calculados à partir das curvas de chegadas e partidas acumuladas, como se mostra na Figura 2.5 que representa graficamente as características temporais e espaciais da fila. O diagrama mostrado foi proposto por DAGANZO (1998). À diferença do diagrama I/O (*input-output*) tradicional (que somente quantifica atraso e o número estimado de veículos em uma fila), o diagrama apresentado proporciona informação adicional necessária para avaliar o impacto do congestionamento, incluindo o tempo total (e distância) consumido pelos veículos nos diferentes estados da fila em função do tempo, e o comprimento físico de uma fila em qualquer tempo.

O tempo de chegada de veículos individuais numa interseção está caracterizado por duas curvas. A primeira curva, $B(t)$, mostra o tempo de chegada dos veículos na interseção

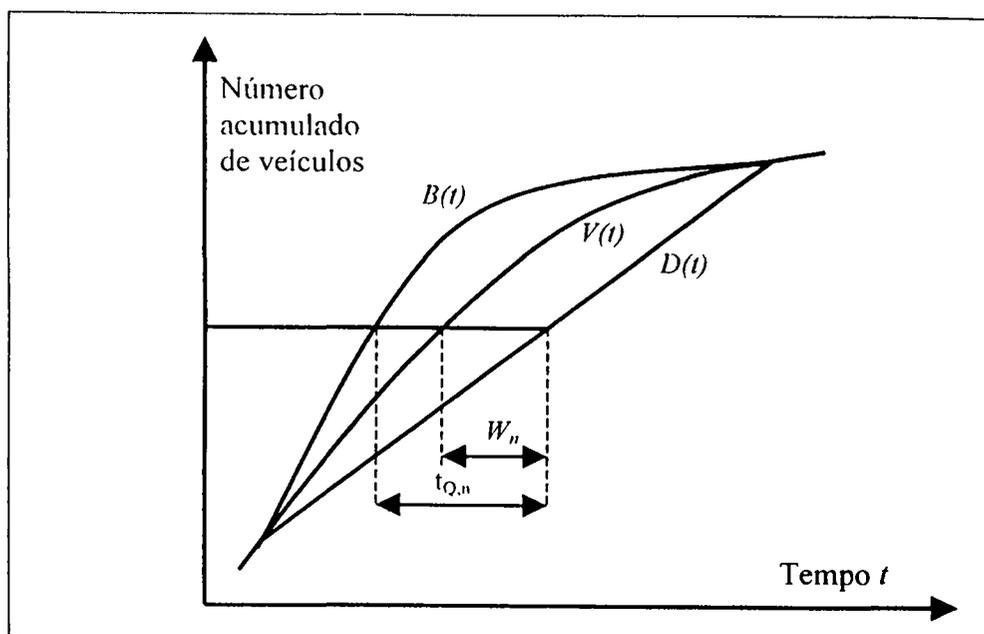


Figura 2.5 Representação gráfica da chegada/partida de veículos numa interseção com fila. Fonte: DAGANZO (1998)

entretanto a segunda curva, $V(t)$, mostra o tempo de chegada dos veículos na interseção em uma situação de congestionamento (tempo de chegada ao final da fila formada). Os tempos de partida dos veículos da interseção são mostrados na curva $D(t)$. A separação horizontal entre $V(t)$ e $D(t)$, w_n , representa o tempo de atraso para um dado veículo, n .

A curva $B(t)$ permite que se determine diversas quantidades práticas diretamente do diagrama. O tempo total consumindo por todos os veículos na fila, T_Q , está representado pela "área" entre as curvas de $B(t)$ e de $D(t)$ (sendo o atraso total para todos os veículos, W , a "área" entre as curvas de $V(t)$ e $D(t)$). O diagrama também indica o número (exato) dos veículos na fila em qualquer tempo t , como a separação vertical entre as curvas $B(t)$ e $D(t)$.

2.7 Conclusão

Neste capítulo, se fez uma introdução da problemática do congestionamento do tráfego, assim como técnicas para seu diagnóstico, e vários outros tópicos relacionados ao controle, como capacidade, desempenho, e variáveis de controle. No capítulo à seguir serão tratados conceitos e métodos de controle assim como diferentes ferramentas usadas para abordar o controle em interseções semaforizadas.

CAPÍTULO 3

CONTROLE SEMAFÓRICO EM REDES VIÁRIAS

3.1 Introdução

Durante períodos de congestionamento, as filas de tráfego são variáveis relevantes a serem controladas. Se durante condições de fluidez do tráfego, o controle de tráfego é necessário para assegurar os padrões de segurança e para minimizar atrasos, durante períodos de congestionamento, o controle é necessário para conter o crescimento de filas nas áreas afetadas.

É evidente pois a necessidade de se efetuar eficientes controles de fluxo, através da regulagem dos tempos de semáforos, e de se definir quais critérios devem ser utilizados para avaliação da performance na operação dos sistemas, a fim de aumentar a segurança e fluidez do tráfego. Por exemplo, benefícios da otimização dos tempos semafóricos, sem mudanças no *hardware*, podem diminuir em torno de 12% o tempo de viagem dos veículos (ITE, 1995). Atualmente existem modelos matemáticos que têm sido desenvolvidos no sentido de simular o padrão de chegada da corrente de tráfego nas aproximações de interseções semaforizadas, alguns dos quais encontram-se inseridos em *softwares* que efetuam a determinação de planos semafóricos.

Neste capítulo se abordará alguns destes modelos para o controle *on-line* e *off-line* tanto para interseções isoladas como redes de interseções, assim como uma breve introdução da administração e controle de operações de um sistema de transporte. Finalmente na seção 3.4 se abordará brevemente alguns dos estudos já realizados com respeito ao problema do congestionamento do tráfego e às diversas formas para contornar o problema.

3.2 Administração e controle de operações no sistema de transporte

Na administração e controle de operações de qualquer sistema de transporte urbano, existem três níveis de decisão (STROBEL, 1982):

- *nível de rede*, que trata das decisões relevantes nas operações do sistema de transporte como um todo;
- *nível de vias/interseções*, trata das decisões relevantes para a operação parcial dos veículos (em parte numa rede), por exemplo, em uma ou diversas vias, nós, ou interseções.
- *nível de veículos*, que concerne decisões para a operação ótima dos veículos individualmente

A hierarquia da administração das decisões é principalmente orientada a aspectos topológicos e de espaço físico. A Figura 3.1 apresenta os três níveis do controle hierárquico detalhados a seguir:

- *orientação para rota e controle ótimos (optimal route guidance and control)*

É a orientação ótima dos veículos individualmente, grupos de veículos ou do tráfego completo, respectivamente, através de uma dada rede, tomando em conta as situações reais do tráfego como as operações de manutenção ou problemas ambientais nas diferentes partes da rede;

- *controle ótimo de fluxo (optimal flow control)*

Se relaciona à otimização da operação para um maior número de veículos em uma ou várias rotas que se conectam;

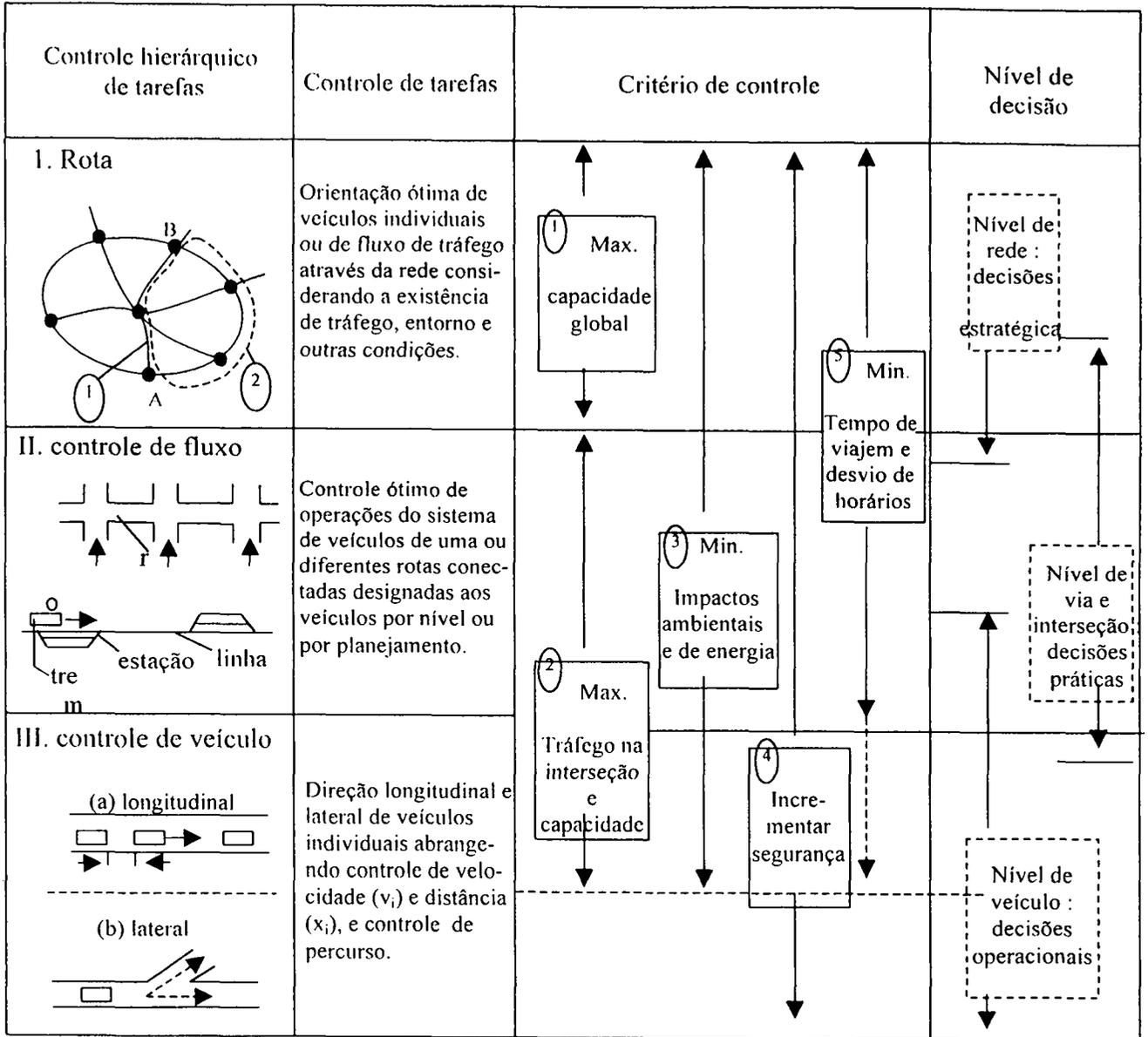


Figura 3.1 Hierarquia do controle de tarefas no tráfego Fonte: STROBEL, 1982

- *controle ótimo veicular (optimal vehicle control)*

Garante um movimento ótimo e seguro de veículos, tomando em conta a orientação lateral e controle longitudinal do veículo, com regulação da velocidade, posição e da distância entre veículos.

Esta hierarquia do controle de tarefas está relacionada com a hierarquia das funções objetivo. Este controle pode ser classificado com base em 5 critérios:

- 1) maximizar a capacidade da rede;
- 2) maximizar a capacidade de interseções críticas¹;
- 3) minimizar o impacto negativo do tráfego no meio ambiente e energia consumida;
- 4) incrementar a segurança no tráfego;
- 5) minimizar o tempo de viagem.

Duas abordagens que podem ser adotadas para o controle de tráfego são o controle *on-line* e o controle *off-line*, abordagens que serão tratadas a continuação

3.3 Controle *off line*

Se o espaço de possíveis respostas de um controlador for previamente definido, diz-se que o controlador utiliza uma técnica de temporização *off-line* (ou de malha aberta). O funcionamento básico de tais sistemas consiste na seleção do conjunto de parâmetros que melhor se adapta à demanda corrente, entre aqueles que foram definidos previamente. Estes vários planos, que são armazenados pelo sistema, podem ser determinados pelos mesmos métodos utilizados em controle pré-temporizado². Para o cálculo dos planos se usa dados com respeito aos tempos de segurança, definição das fases, volumes de tráfego, fluxo de saturação (informação obtida por observação do tráfego e as características físicas da rede viária), constituindo-se cada plano dos tempos de ciclo para as interseções, tempos de cada fase e defasagem (*offset*). Defasagem é o tempo de início do verde de cada semáforo tomando como referência um deles (ver Figura 3.2).

¹ Uma interseção é chamada de crítica quando apresenta uma demanda maior que a sua capacidade numa unidade de tempo.

² Sistema de controle pré-temporizado: sistema que põe em ação planos pré calculados, de acordo com estratégias definidas, e que não interage com o ambiente em tempo de operação.

Para o cálculo dos planos, pode-se usar métodos analíticos, como o método de *Webster*, (no caso de interseções simples), ou métodos algorítmicos, como realizado pelo método de *Transyt*, usado para interseções mais complexas e de redes de interseções.

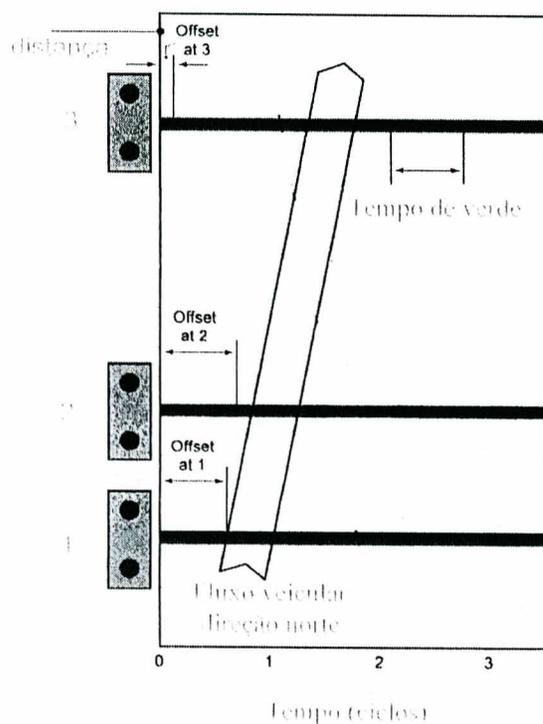


Figura 3.2: Defasagem ou *offset*

Dentre os métodos analíticos de obtenção de planos para sistemas isolados operando em tempo fixo, o método de WEBSTER *et al* (1966) é o mais conhecido e difundido. O modelo de WEBSTER tem como função objetivo o atraso final na interseção, definido pelo somatório das parcelas de atraso uniforme e aleatório em cada aproximação. Dentre os métodos algorítmicos a ferramenta *Transyt* atualmente é a mais usada, já que permite obter o conjunto de sinais coordenadas para um conjunto de semáforos, sendo usada tanto como uma ferramenta de otimização como de simulação, da qual se tratará com mais detalhe posteriormente.

3.3.1 Princípios gerais

Pode-se chamar de pelotão (*platoon*) o grupo de veículos que se forma devido à intermitência do fluxo de veículos provocada pela operação semáforica; isto é, o fluxo veicular interrompido durante o tempo de vermelho se agrupa em um pelotão, o qual tende a se espalhar com o início de verde até a interseção seguinte. Já que em redes urbanas a distância entre interseções vizinhas é normalmente demasiado pequena para que o pelotão liberado por uma interseção se disperse completamente antes de chegar à interseção seguinte (quase um quilômetro é requerido para completar a dispersão do pelotão), podem ser obtidos benefícios através da coordenação de sinais.

A coordenação semáforica é estabelecida através da definição de *offsets* adequados entre as interseções da rede, por intermédio dos quais procura-se privilegiar o maior número possível dos veículos que nela trafegam. Através da coordenação, em certas circunstâncias é possível estabelecer uma onda verde (*green wave*) por meio da qual um pelotão do tráfego pode passar através de uma seqüência de interseções, sem parar. Alternativamente, o risco de filas excessivas entre duas interseções poder ser reduzido por meio da coordenação. Outros benefícios da coordenação incluem: redução nas variações de velocidade nas vias principais, melhorando deste modo a segurança da estrada, e a melhoria do conforto do serviço de transporte público por reduzir a necessidade de paradas nas interseções.

Em redes viárias é difícil obter uma boa coordenação nas vias, sem levar em conta todas as vias da rede. Duas abordagens para lidar com isto são:

- *pró-ativo (proactive)*: inicia identificando os trajetos para onde se deseja atrair o tráfego, tais caminhos são usualmente vias de grande capacidade. A coordenação é usada para reduzir o tempo da viagem destas vias, a custo do tempo empregado nas outras vias das quais se pretende desviar o tráfego;
- *reativo (reactive)*: nenhum trajeto particular é priorizado. A coordenação procura otimizar o desempenho de algum deslocamento predeterminado (*performance index*), tal como por exemplo uma combinação balanceada de atrasos e paradas.

3.3.2 *Transyt*

O programa *Transyt* é um *software* simulador do comportamento de tráfego em uma rede viária, definindo *offset* e, opcionalmente, os tempos de verde otimizados para cada interseção semaforizada. O mesmo é composto de um modelo de simulação para o comportamento do tráfego e de um modelo de otimização dos planos semaforicos (PORTUGAL e SILVA, 1993) como mostrado na Figura 3.3

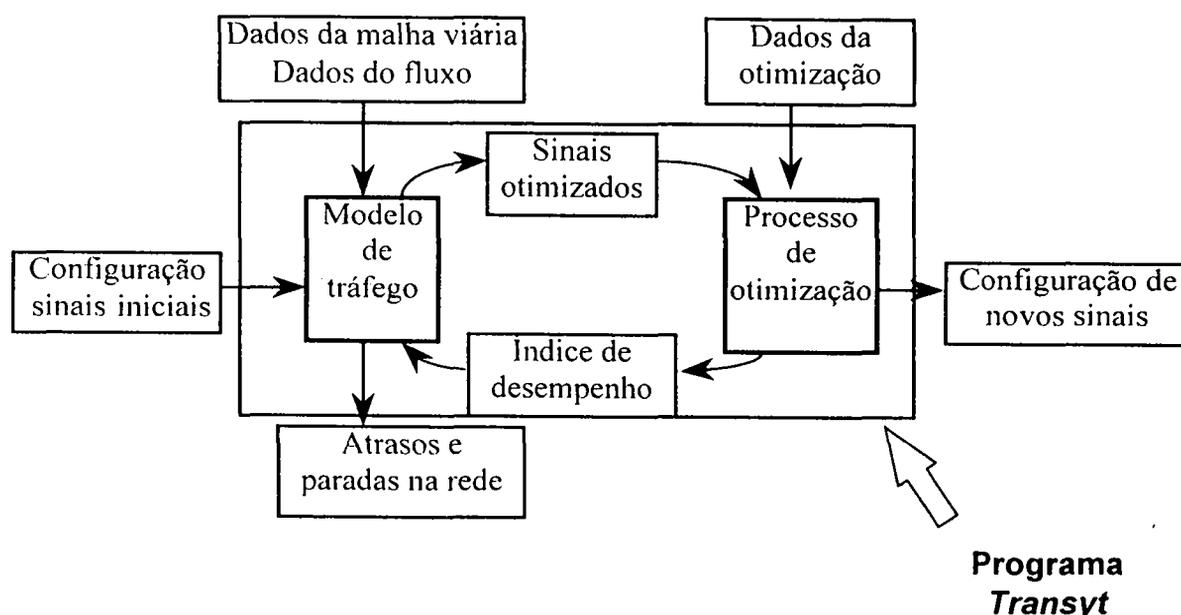


Figura 3.3 Estrutura do programa *Transyt*

A função objetivo do *Transyt* é uma combinação linear do número de paradas e do atraso sofrido pelos veículos, sendo conhecido seu valor como Índice de Desempenho (ID). A base do modelo de simulação é a representação dos padrões cíclicos de tráfego (PCT). Estes padrões nada mais são do que as representações das taxas médias de chegada em unidades de carro particular (*pcu's*, *passenger-car unit*), para pequenos intervalos do ciclo, denominados de passos (*steps*). A precisão do modelo está associada a quantidade de passos adotada (VINCENT *et al*, 1980).

O *Transyt* trabalha na busca de um plano de sincronismo que cause menos penalidades à rede em observação. Estas penalidades são representadas pelo cálculo de um

certo ID. A rotina do programa determina, para uma série de tempos de ciclo, o valor do ID para cada um dos nós, sempre na busca do menor valor. Os ciclos são escolhidos de forma a resultar em graus de saturação menores que 90 %. Este procedimento busca obter sempre valores menores para o ID, através de alterações nos *offset* e duração das fases na rede. Assim são obtidas uma série de ondas verdes multidirecionais na rede, reduzindo os tempos de viagem em seu interior (VINCENT *et al*, 1980).

O *Transyt* é considerada atualmente uma das mais efetivas ferramentas para calcular conjuntos de sinais coordenados, sendo usado tanto como uma ferramenta de planejamento como de simulação. A sua principal vantagem está em que todas as interseções da rede são levadas em conta para determinar o tempo de ciclo, *green splits* e *offset*. Isto não garante o ótimo global, mas procura por uma boa solução tomando em conta muitos parâmetros (ex.: características como dispersão do pelotão). Permite também que o usuário introduza prioridades subjetivas entre o vários objetivos (ex: diminuição do número de paradas, consumo de gasolina).

Apesar do uso intensivo do *Transyt* este não é apropriado para tratar redes congestionadas. O *Transyt* tem duas desvantagens quando trata condições de saturação. A primeira é que o comprimento das filas é tratado como uma saída do programa mas estes não são considerados na função objetivo ou como uma restrição. O outro problema, mais severo, parte dos requisitos de ingresso dos volumes em cada *link* antes de se executar o processo de otimização. Em redes não congestionadas, quando houver um ciclo deficiente, estes volumes são simplesmente a soma sobre a demanda de todos os movimentos que conduzem a um determinado *link*. Quando a rede se torna congestionada e se acumulam as filas, o volume de certos *links* serão determinados pela duração do verde. Já que o *Transyt* requer os volumes de tráfego para calcular os planos de sinais, e os volumes são determinados pela duração do verde, se cria um círculo vicioso. Uma solução para este problema poderia ser a determinação simultânea dos volumes e tempos de verde, com a ajuda de um programa externo, mas a capacidade do programa em planejar tempos ótimos estaria perdida, restando apenas a funcionalidade de otimização dos *offsets*.

3.4 Controle *on-line*

Se os planos semafóricos forem gerados em tempo real, sem recorrer a um banco de dados previamente calculado, diz-se que o sistema utiliza técnica de temporização *on-line* (ou sistemas em malha fechada). O controle *on-line* tem sido apreciado por muito tempo pelos benefícios significativos que podem ser obtidos ao permitir uma rápida resposta dos sinais de tráfego às variações do fluxo veicular.

Através da coordenação de sinais, a capacidade de resposta pode ocorrer a nível da interseção ou a nível de rede. O equilíbrio entre resposta local ou da rede depende entre outras coisas do nível de tráfego. Sob circunstâncias leves do tráfego, (por exemplo, à noite), uma resposta local pode ser suficiente e a coordenação pode resultar *de facto*. Não obstante, durante períodos de pico, os benefícios de uma coordenação imposta podem ser significativos.

Ainda se debate se o controle deve ser pró-ativo ou reativo. Num nível operacional, o controle puramente reativo pode levar a problemas em situações de congestionamento. Decisões tomadas nos limites de uma cidade, podem resultar, por exemplo, em muito tráfego tentando chegar ao centro da cidade. Para evitar este problema, estratégias *proactive gating* podem ser desenvolvidas, mediante o acesso racionalizado de veículos a uma área ameaçada com congestionamento de modo que este não ocorra. Isto pode ser feito por meio de uma re-distribuição das filas para outras vias que tenham ainda capacidade. Por causa dos atrasos envolvidos no próprio processo do tráfego (filas tomam um tempo para formar-se e dissipar-se), as decisões que afetam os sinais de controle de tráfego devem ser baseadas nos efeitos previstos no desempenho.

Para controle de redes de semáforos, os sistemas de malha fechada são usualmente classificados em três gerações .

3. 4.1 Primeira geração

A primeira forma de controle *on-line* consiste na seleção de planos computados em malha aberta (*off-line*) a partir da informação captada por sensores. Representa um avanço com relação à seleção de planos de acordo como horário do dia (como nos sistemas multi-planos em malha aberta), mas não tem a capacidade de gerar um plano ajustado para as condições vigentes. A principal vantagem é que estes é facilmente implementado com pequeno custo computacional. No caso dos semáforos de tempo fixo, este controle se dá através do estabelecimento da duração do ciclo, do número, seqüência e duração das fases, duração dos intervalos e, para semáforos operando em rede, dos *offsets*. A principal desvantagem radica no tratamento das condições de fluxo saturado.

Um dos elementos chaves para a determinação dos planos semaforicos é o volume de tráfego, o qual possui como característica sua variabilidade ao longo do tempo. Esta variação temporal dos volumes, ao longo do dia e nos diferentes dias de semana, identifica a necessidade de estabelecer planos semaforicos distintos para diferentes períodos do dia e/ou dias da semana, os quais serão implementados de acordo com as condições de tráfego sazonais. O que gera a desvantagem de ter que gerar um número de planos grande para poder atender todas as possíveis situações de uma rede ao longo do dia.

MILLER (1963) também desenvolveu um método para a determinação de planos semaforicos a tempo fixo para interseções isoladas, com até quatro aproximações e operando com duas fases, que busca minimizar o atraso estimado à partir da hipótese de que as chegadas dos veículos na aproximação seguem um processo estocástico com distribuição de probabilidade binomial. Outro procedimento de otimização bastante difundido foi proposto por ALLSOP (1971) e posteriormente implementado no programa SIGSET. A formulação deste método baseia-se na expressão simplificada do atraso médio de WEBSTER, utilizando um modelo de programação linear para calcular os valores de tempo de ciclo e repartições de verde que minimizam o atraso total na interseção.

3.4.2 Segunda geração

A Segunda geração corresponde á adaptação *on-line* dos planos para as condições vigentes. Pequenas variações são consideradas para o ciclo, os tempos das fases e os *offset*, em períodos variando de um a dez minutos. Entre os *softwares* disponíveis por exemplo se tem : *SCOOT*, *SCAT*, *CALIFE*. Entre as limitações da segunda geração é o desprezo no processo de otimização das condições de saturação. A seguir se abordará com mais detalhe um destes *softwares*.

SCOOT :

Uma implementação *on-line* do modelo de tráfego de fluxo cíclico pode ser encontrado no SCOOT (*Split Cycle and Offset Optimisation Technique*). O modelo de tráfego SCOOT trabalha com dados que variam no tempo (ex: tempos de verde e vermelho, veículos detectados pelos sensores), dados que são tomados de uma determinada área de controle, e que serão usados para prever filas congestionadas, atrasos e paradas. A informação registrada pelos sensores é guardada no computador com o nome de: “Perfil de Fluxo Cíclico”, onde cada perfil consiste de um histograma , que registra como o fluxo de tráfego varia durante o tempo de ciclo (recebe o nome de cíclico, pois o modelo tende a ser repetitivo em ciclos subsequentes).

O modelo de tráfego SCOOT mede a proporção do tempo de ciclo em que o detetor de tráfego é ocupado por um veículo. Esta informação é usada pelo otimizador para alterar os tempos dos sinais, assim como também reduzir a probabilidade de que uma fila bloqueie uma intercessão.

As variáveis de controle são o *split* (a divisão do tempo de verde entre as fases em cada interseção), *offset* (definido anteriormente) e o tempo de ciclo (que é comum para toda a região a ser estudada). O *split* de cada região é mudado para alcançar o mesmo grau de saturação para cada fase. Os tempos de *offset* são alterados para maximizar o índice de desempenho, assim como o tempo de ciclo é modificado para manter o máximo grau de

saturação (próximo a 0.9). Modelos de tráfego como *SCOOT* e *Transyt*, são similares, no sentido de que ambos realizam tentativas sistemáticas para estabelecer os tempos de fluxo de sinais e implementar somente aquelas alterações onde o modelo de tráfego é benéfico, tentando prever as conseqüências, e os efeitos no tráfego das alterações dos tempos de sinalização feitos.

3.4.3 Terceira geração

Para os sistemas da terceira geração a adaptação por otimização se realiza nas condições atuais de tráfego prevendo os efeitos futuros. Otimização que é realizada a cada poucos segundos. A coordenação é realizada através da troca de informações sobre o tráfego futuro entre as otimizações associadas a cada interseção. Os métodos mais conhecidos são OPAC, UTOPIA e PRODYN. As diferenças entre os métodos situam-se a nível de fila de espera, do algoritmo de otimização e dos esquemas de coordenação adotados. Entre as limitações desta terceira geração, o problema da estimação de fila de espera e da complexidade da otimização existe. Além disso, esta geração é capaz de controlar uma saturação primária com bom desempenho, mas apresenta deficiências em condições de saturação secundária (bloqueio da interseção precedente)

O controle de sinais de tráfego adaptativo está despertando atualmente muita atenção devido à flexibilidade e o potencial que oferece (BELL,1993). Esta abordagem foi adotada por sistemas de controle do sinal, especialmente o OPAC (Gartner,1983) nos Estados Unidos, o PRODYN (HENRY *et al*, 1983) e o UTOPIA (MAURO *et al*, 1989) na Europa.

Como ilustrado na Figura 3.2, o enfoque do controle adaptativo considerado aqui requer a especificação de um horizonte deslizante sobre o qual a duração ótima da fase (e potencialmente também da seqüência de fases) é desejada.

Um horizonte deslizante (de até 2 min) é requerido (os sistemas OPAC, PRODYN e UTOPIA usam um intervalo de decisão de 3 segundos). Isto é devido ao custo envolvido por comutar de uma fase à seguinte em períodos curtos. Desde que as decisões à respeito

da mudança ou não dos sinais dos semáforos são tomadas somente em intervalos discretos de tempo, é possível representar todas as seqüências de decisões do horizonte deslizante como uma árvore de decisões (*decision tree*) como se mostra na Figura 3.4. Esta árvore possibilita associar um custo a cada decisão onde cada arco representa uma decisão.

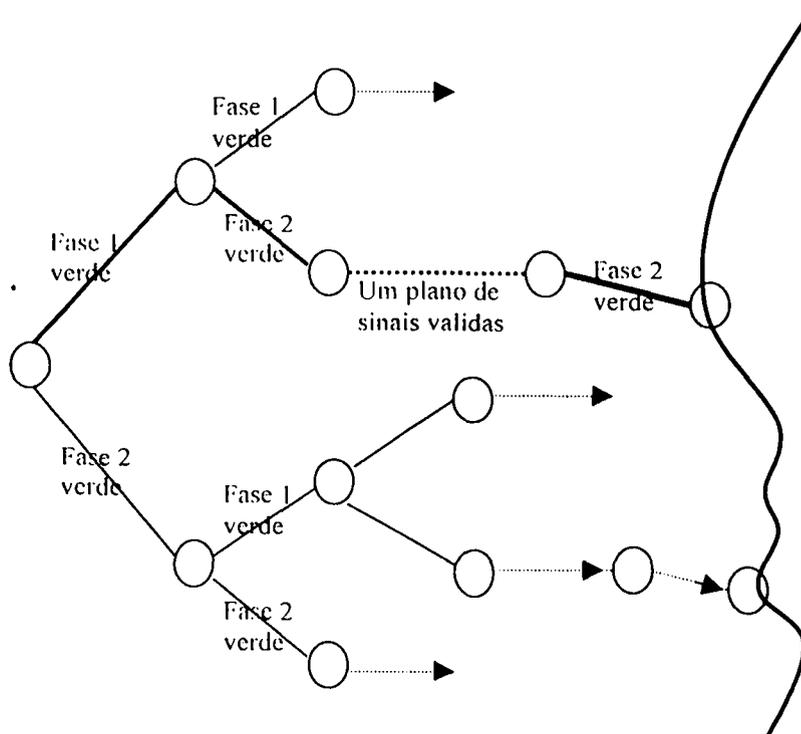


Figura 3.4. Exemplo de um árvore de decisões

O peso do arco é o custo esperado da decisão representada. Geralmente se assume ser uma combinação linear de atrasos e número de paradas.

Uma vez que uma seqüência ótima de decisões foi determinada, a primeira delas é implementada, o horizonte é propagado para frente e o processo inteiro da otimização é repetido. Se as decisões são tomadas a cada três segundos, o intervalo do horizonte é definido como três segundos. Quando é requerida prioridade para transporte público, a complexidade da otimização é reduzida. Os requisitos de verde para um horário em particular para uma certa via reduzem o número de possíveis seqüências na árvore de decisões.

3.5 Congestionamento em redes urbanas

O congestionamento em uma rede urbana é um dos problemas mais urgentes com os quais se confrontam os engenheiros de tráfego. McSHANE and ROESS (1990) enfatizam que a saturação não seria meramente outro aspecto dos problemas comuns do tráfego urbano; atrasos e paradas representariam um novo conjunto de problemas. A razão está relacionada com o conjunto de problemas gerados quando uma interseção é bloqueada. Bloqueio ou *spillback* acontece quando uma fila inicia em uma interseção estendendo-se em sua totalidade, até o bloqueio da interseção a montante. Além de causar uma deterioração na capacidade da interseção, eventualmente conduz a uma propagação da diminuição da capacidade nas interseções vizinhas. Neste ponto, a formação de filas nas interseções tornará congestionadas as rotas que apresentariam condições normais de tráfego em horário pico, se não fosse pelo bloqueio.

Várias pesquisas tem estudado o problema do congestionamento. GAZIS (1968) foi um dos pioneiros neste campo, tentando melhorar o desempenho das interseções críticas. Para isto considerou uma interseção isolada, com duas fases de controle. A estratégia desenvolvida era composta de dois programas, um deles a ser implementado na primeira parte (durante as horas de maior tráfego) e a outra durante a segunda fase de menor volume. O programa linear resultante não poderia prevenir bloqueios em interseções adjacentes, pois trata do problema de interseções isoladas.

MICHALOPOULOS e STEPHANOPOULOS (1979) continuaram este trabalho e tentaram estender o problema fazendo modificações no algoritmo. A saturação foi tratada limitando o comprimento das filas. Formularam também as interdependências entre as interseções numa rede e solucionaram as equações que representavam todas as interseções simultaneamente.

SINGH e TAMURA (1974) abordaram o problema do ponto de vista de redes. Assumindo que a demanda excedia a capacidade de todos os *links*, descreveram o tráfego

por meio de um conjunto de equações diferenciais. Um problema de otimização foi proposto com o objetivo de minimizar o comprimento das filas ajustando o tempo dos *splits*

LIEBERMAN (1990), MAcSHANE e ROESS (1990), e KIRBY (1992), sugeriram a contagem do número dos veículos permitidos na rede. O fenômeno dos níveis de demanda acima da capacidade existe durante períodos curtos durante a hora de maior congestionamento. A solução é conhecida como *freeway control* (LINDLEY,1992). LIEBERMAN fez distinção entre o tratamento dado a uma interseção principal e aquele dado a uma interseção crítica. Ele formulou várias funções objetivo para controlar o fluxo de tráfego ao longo de um via considerando filas e explicitamente os *spillbacks*, enfatizando o objetivo do uso eficiente de diversas partes de uma via como *buffers*. Para o controle em interseções críticas (IC) LIEBERMAN apresentou um modelo matemático para uma rede que continha ao menos uma IC. A função objetivo neste caso era a liberação das filas nas proximidades de uma IC de acordo com prioridades predeterminadas.

MCSHANE e ROESS registraram três tipos de medições: interna, externa e liberadas. Medições internas controlam o grau de liberação dos *links* internos de uma rede para evitar que muitos veículos alcancem a interseção crítica. Medições externas são usadas para limitar o número de veículos que ingressam numa rede. Medições liberadas são usadas para regular a saída de veículos de garagem e zonas de estacionamento.

Durante os horários de pico, é inevitável que as filas fiquem obstruídas, por isto a necessidade de determinar seu posicionamento é importante, para distribuir as filas sobre a rede de tal maneira que os danos que possam causar sejam mínimos (especialmente os danos dos *spillbacks*).

EDELBUTTEL e CREMER (1994) apresentaram um modelo matemático usando programação linear que trata de condições de congestionamento em redes urbanas, de formas de não violar as restrições de capacidade das vias internas, garantindo desta forma o não bloqueio das vias internas, atendendo desta forma a máxima quantidade de veículos. Além disso, os autores levam em conta que, em condições de saturação, os fluxos de ingresso nas vias são *o resultado* do processo de otimização, mas, por paradoxo, sempre foram utilizados como *a entrada* de dados para esta mesma otimização. Esta situação de “*loop-algébrico*” foi contornada pelos autores com um algoritmo iterativo, a ser visto no capítulo seguinte.

3.6 Conclusão

Foram descritas neste capítulo algumas das diferentes ferramentas que se usam atualmente para o controle de tráfego, tanto *on-line* como *off line*. No controle *off-line*, se abordou especialmente o *software Transyt*, dado que se trabalhou com ele no estudo do trecho da malha viária a ser discutido no Capítulo 5, mostrando as vantagens e desvantagens de seu uso. No controle *on-line* tratou-se uma abordagem para cada uma das gerações de controle *off-line* apresentadas: a seleção dinâmica de planos, o uso do SCOOT para maximizar o índice de desempenho de um conjunto de semáforos e o controle por propagação de horizontes, abordagem adotada por sistemas como OPAC, PRODYN e UTOPIA. Finalmente na seção 3.4 se fez uma introdução dos estudos realizados recentemente para tratar os problemas que envolve o congestionamento de tráfego.

O próximo capítulo apresenta o método de Programação Linear escolhido para tratar o problema do congestionamento no tráfego urbano.

CAPÍTULO 4

OTIMIZAÇÃO EM REDES URBANAS SATURADAS

4.1 Introdução

Neste capítulo se apresentará o uso de programação linear aplicada ao projeto de planos semaforicos numa rede de tráfego congestionada. Um modelo matemático é usado para descrição da malha viária a ser controlada por planos fixos. O modelo de otimização adotado foi proposta por EDELBÜTTEL e CREMMER (1994).

Os autores analisam e resolvem um problema existente em outros métodos de maximização da capacidade baseados em programação linear (PL), qual seja, a hipótese de que os fluxos de entrada na malha viária são *independentes* da temporização semaforica. Esta hipótese só é válida para casos não-congestionados, nos quais todo o fluxo que chega na malha viária durante um ciclo em questão é atendido. No caso de congestionamentos, porém, as composições de origem-destino dos fluxos internos da malha são funções dos tempos de verde, isto é, funções do resultado da otimização. Então, o resultado da otimização afeta os valores utilizados em sua obtenção, invalidando-os a menos do caso particular em que, após a otimização, as composições de fluxos permaneçam idênticas àquelas que serviram de dados de entrada para a otimização. Para corrigir tal problema, os autores propõem um método iterativo que recalcula as composições dos fluxos de entrada com base nos tempos otimizados na iteração anterior, e executa otimizações sucessivas até que as composições sejam suficientemente próximas entre duas iterações sucessivas.

A função objetivo do modelo busca maximizar a quantidade de veículos a serem atendidos. Isto contrasta com métodos de otimização para condições não saturadas que buscam minimizar o atraso diretamente. Durante períodos de congestionamento o tempo gasto pelos veículos para serem atendidos depende das taxas de serviço da rede, isto é da

quantidade de veículos a ser atendida. O objetivo principal do sistema projetado é limitar a quantidade de veículos ingressados na rede para evitar bloqueios internos, ao mesmo tempo em que procura maximizar a taxa de serviço. Os veículos não atendidos são acumulados nas vias de entrada da rede, que fazem o papel de *buffers*.

O método adotado não faz o cálculo dos *offsets* entre sinais adjacentes para implementação de “ondas verdes”. Esta é uma prática comum em muitos métodos de PL para simplificar o processo de modelagem (otimização) (PRASHKER *et al*, 1994). Além disso, nos casos em que todas as interseções estão sobre-saturadas, o *offset* não afeta o desempenho do sistema (FARGES, 2000).

4.2 Problemas com o *Transyt*

O uso do modelo de otimização do *Transyt* apresenta problema quando lida com condições de sobre-saturação. O problema surge porque deve-se informar os volumes a serem atendidos pelos semáforos antes de se iniciar o processo de cálculo otimizado dos tempos, isto é, o *Transyt* exige que se informe estes volumes antes da simulação e otimização. Em redes **não congestionadas**, tem-se um ciclo com folga, e estes volumes são simplesmente a soma correspondente à demanda de todos os fluxos que conduzem a uma determinada via.

Quando a rede **se torna congestionada** e se acumulam as filas, os volumes de certas vias serão determinadas pela duração do verde. Em outras palavras, durante um congestionamento, estes volumes são algumas vezes determinados pela duração do tempo de verde. Desta forma, um círculo vicioso é estabelecido: o *Transyt* requer estes volumes para calcular a programação de sinais, mas estes volumes são determinados pela duração do tempo de verde. Este problema também foi percebido por PRASHKER (1994), que propõe um método para contornar tal dificuldade. Tal método não é adequado na medida em que restrições artificiais tem que ser impostas ao modelo de tráfego original, sem que se tenha garantias da fidedignidade do modelo resultante. Este aspecto, junto com a inviabilidade do uso do programa *Transyt* para situações de saturação, motivou o estudo do algoritmo discutido a seguir.

4.3 Procedimento de otimização adotado para o controle de redes congestionadas

O modelo de otimização adotado, proposto por EDDELBÜTTEL e CREMMER (1994), tem como objetivo atender a máxima quantidade de veículos numa rede viária saturada. O procedimento de otimização é realizado em seis passos:

- (1).- Determinar as taxas de conversão dos fluxos na rede,
- (2).- Calcular o novo ótimo (critério PL: máx. capacidade),
- (3).- Calcular a nova taxa de conversão do comprimento ótimo da fila,
- (4).- Se o fluxo associado não é possível, ir para 6,
- (5).- Continuar no passo (2) usando as novas taxas de conversão
- (6).- Determinar o plano de tempos dos fluxos resultantes.

A seguir, discute-se em detalhes os passos de (1) a (3) do algoritmo.

Primeira etapa: Determinar as taxas de conversão

Numa via, as frações de tráfego seguindo diferentes direções são denominadas de taxas de conversão (*turnig ratios*) e relacionam percentuais de tráfego movimentando-se da via j para a via i . Os valores iniciais para as taxas de conversão são calculados à partir da hipótese de que a rede é esvaziada ao final do período controlado. Em outras palavras, todos os veículos nas filas iniciais, e todos aqueles que chegaram nos intervalos subsequentes, alcançaram seus destinos. Por exemplo na interseção B da Figura 4.1, a via 2 para a via 7 tem um fluxo de saturação $s_{2,7} = 0,45$ pcu/s (*pcu* – *passenger car unit*, ou unidade equivalente a carro de passeio), e uma taxa de conversão de $\beta_{2,7} = 1.0$ devido a que 100% dos veículos da via 2 se dirigirão para a via 7. Faixas de uma via podem ter diferentes fluxos de saturação segundo as diferentes rotas que seguem. Por exemplo a via 6 da Figura 4.1 tem dos fluxos veiculares, aqueles que se dirigem para a via 7, cujo fluxo de saturação é $s_{6,7} = 0,38$ pcu's/s, e aqueles veículos que se dirigirão para a via 2, cujo fluxo de saturação é $s_{6,2} = 0,50$ pcu's/s. As taxas de conversão para cada uma destas direções baseia-se no fluxo total da via 6.

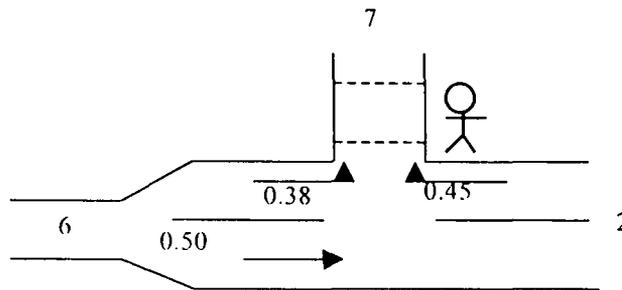


Figura 4.1 Interseção B com seus respectivos fluxos de saturação

Como se pode observar, a influência da geometria no fluxo de saturação dos veículos se manifesta nas conversões dos veículos na interseção. Isto se deve a que os veículos que convergem tanto à esquerda como à direita reduzem sua velocidade de percurso, diminuindo conseqüentemente a fluidez do tráfego. Como a classificação dos veículos é feita por tipo e manobra, caso se queira dar preferência a veículos de uma classe específica, o uso de uma faixa dedicada é necessária para permitir que se desviem da fila.

Segunda etapa: Calcular o novo ótimo (PL critério : máx. capacidade)

Para obter um bom desempenho num sistema controlado é preciso atingir uma série de objetivos que estão associados com as características da rede viária e/ou de resposta do sistema. A modelagem das interseções é feita usando Programação Linear, cuja função objetivo é maximizar a quantidade de veículos que podem ser atendidos (variável $x_{j,t}$). Como se mostra a seguir na Equação 4.1

$$\text{Max} \rightarrow \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \left(\sum_{\tau=t}^T 2d_{\tau} - d_t \right) \beta_{jit} x_{jt} - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M (e_{it} d_t + e_{i,t+1} d_{t+1}) z_{it} \quad (4.1)$$

Onde :

- $x_{i,t}$: veículos partindo da via i no intervalo t
- $y_{i,t}$: filas nas vias internas e externas, ao final do intervalo de tempo t ;
- $\beta_{j,i,t}$: taxa de conversão da via j para a via i no intervalo de tempo t ;
- M : representam as vias que ingressam/saem da rede;
- N : representam as vias no interior da rede ;
- T : período de controle

- $z_{i,t}$: espaço extra disponível nas vias externas.
 d_t : corresponde a duração do intervalo de controle t
 $e_{i,t}$: fatores de peso para filas formadas fora da malha em questão.

A primeira parte descreve o número de veículos que saem do sistema até o fim do período do controle. A segunda parte leva em conta os efeitos de trasbordos na rede. As restrições na modelagem abrangem a geometria da rede viária e as restrições temporais e de conflitos.

Terceira etapa: Calcular a nova taxa de conversão do comprimento ótimo da fila.

A máxima quantidade de veículos a serem atendidos x_{it} que pode ser tratados numa interseção durante o intervalo de controle d_t , é garantida pelo algoritmo simplex sempre e quando a formulação do problema e as restrições estejam corretas.

Caso se tenha mais de um subperíodo de controle, durante o próximo intervalo de controle o volume de todas aquelas rotas que realizam a mesma manobra é adicionado às filas formadas pelo período anterior, $y_{i,t-1}$, que refletido numa matriz O-D mostra a contribuição das outras vias ao volume de tráfego desta via.

EDDELBÜTTEL e CREMER (1994) relatam que a experiência no uso do algoritmo indica que a convergência é excelente para problemas com interseções simples, adequada para problemas de dois intervalos e progressivamente pior para um maior número de períodos de tempo. Os tempos efetivos de verde de cada interseção são calculados à partir dos volumes de veículos que podem ser atendidos.

4.4 Determinação do tempo de ciclo nas interseções críticas

No modelo proposto um tempo de ciclo c_k pode ser adotado para todas as interseções, de $k=1, \dots, K$. Este tempo de ciclo é fixo para cada interseção e conhecido *a priori*, permanecendo constante durante todo o período de controle. Em interseções com grande capacidade de armazenamento, engenheiros de tráfego tendem a usar ciclos maiores

para interseções críticas, baseados na observação de que, se o ciclo é maior, o número de ciclos por hora decresce, e conseqüentemente o tempo total perdido por hora decresce, aumentando a capacidade da via (MICHALOPOULOS, 1979).

Apesar desta observação estar correta, pode-se argumentar que, depois de um certo valor do ciclo, o incremento na capacidade da interseção é quase insignificante e que, em casos não saturados, existe um valor do ciclo que minimizará o atraso dos veículos. Isto é evidente, por exemplo, quando se usa valores extremamente grandes para o ciclo o que resulta em tempos de verde prolongados e conseqüentemente atrasos maiores para aqueles fluxos veiculares em espera. Finalmente, pode-se notar que o cálculo deste tempo é um fator determinante de eficiência de cada movimento da interseção crítica, e das durações de verde que permitam obter esta eficiência. Ciclos muito extensos ou muito pequenos podem resultar na formação de grandes filas, e conseqüentemente resultar em violações de capacidades das vias. (MICHALOPOULOS, 1979).

Em redes com pequena capacidade de armazenamento interno de veículos, não é aconselhável o aumento do ciclo. Por exemplo, o método proposto por MAHALEL *et al* (1991) considera explicitamente a deterioração do fluxo de saturação como uma conseqüência da extensão dos tempos de verde acima de um certo valor. Este método apela para uma curta duração do tempo de verde. Isto é, minimizar o tempo de verde visando alcançar um fluxo de saturação maior, e prolongar o tempo de ciclo objetivando minimizar a fração de tempo perdido. Uma eficácia máxima é obtida determinando o tempo de verde, de forma que o fluxo de saturação marginal seja idêntico para todas as fases. Neste ponto o fluxo máximo médio de saturação é alcançado.

4.5 Formulação do modelo da rede usando programação linear

O modelo usado, proposto por EDDELBÜTTEL e CREMER (1994) limita o volume de veículos que ingressam na rede, de maneira que as restrições da capacidade não sejam violadas ao longo do período controlado. O processo está baseado nas seguintes suposições:

- o tempo de ciclo para cada interseção é determinado previamente, e permanece constante durante o período de controle;
- a demanda e fluxos de saturação da rede são determinísticos;
- o período de controle T pode ser dividido em um número limitado de intervalos $t = 1, \dots, T$, cada um destes podendo receber diferentes durações de tempo d_t .

Como se assume que a demanda é determinística e constante durante o intervalo de tempo t , o comprimento da fila em cada via pode ser igual a zero ou crescer até atingir o comprimento máximo permitido. Isto assegura que o número de veículos que ingressa na rede não exceda a capacidade da mesma.

Então, o **primeiro maior grupo de restrições** relacionado à otimização se baseia na geometria da rede viária para estabelecer os limites das filas formadas nas vias internas e externas, como é mostrado nas seguintes restrições:

$$0 \leq y_{it} \leq l_i \quad \forall (i, t) \mid i \geq M + 1 \quad (4.2) \quad \text{vias internas}$$

$$0 \leq y_{it} \leq l_i + z_{it} \quad \forall (i, t) \mid i \leq M \quad (4.3) \quad \text{vias externas}$$

Na modelagem:

- M : representam as vias que ingressam/saem da rede;
- N : representam as vias no interior da rede ;
- $y_{i,t}$: filas nas vias internas e externas, ao final do intervalo de tempo t ;
- l_i : máxima quantidade de veículos que pode formar-se em a cada via i ;
- $z_{i,t}$: espaço extra disponível nas vias externas.

Como se assume que o sistema tem um serviço contínuo de chegadas, o comprimento extra das filas geradas durante o período de vermelho não é considerado.

No processo de solução do problema de maximização da capacidade do cruzamento usando o método proposto por EDDELBÜTTEL e CREMER (1994), considera-se que os destinos dos veículos são conhecidos *a priori* para todas as vias de origem. Deve-se especificar o fluxo veicular até as vias de saída, a_{it} , durante cada intervalo de tempo t

podendo existir diferentes planos de chegadas de veículos na rede. Aqueles veículos que não são atendidos no intervalo de tempo t , são adicionados ao próximo plano de chegadas para poderem ser atendidos no intervalo de tempo $t+1$. Por conseguinte as demandas médias pode ser especificadas em rotas individuais, e representadas em uma matriz origem destino (O-D), ver Figura 4.2

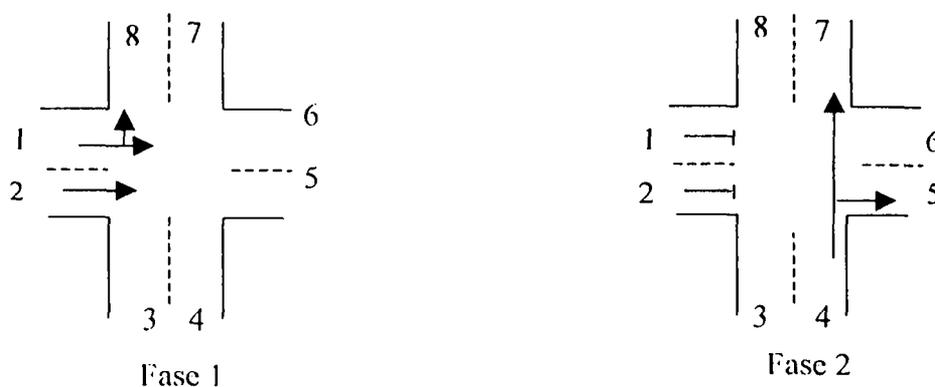


Figura 4.2: Interseção de duas fases com quatro faixas.

Já que a composição dos veículos passando através da linha de parada depende da composição da fila formada e das novas chegadas de veículos (determinados pelas temporizações nas interseções), assume-se que os veículos podem abandonar a rede pouco depois que estes passaram pela última interseção de sua rota.

Diferentes métodos de programação foram propostos como solução para problemas similares. ALLSOP (1972) usou a programação linear para maximizar o fluxo que podia passar completamente numa interseção. Já YAGAR (1974) propôs um método capaz de tratar interseções onde o fluxo de saturação pode variar de uma fase para outra, e avaliava qual era o impacto dos tempos de verde na formação de filas. O modelo proposto por EDELBÜTTEL e CREMER (1994) é uma extensão do método proposto por D'ANS *et al* (1976), com a diferença de que se pode modificar a matriz O-D em cada interseção, para refletir as mudanças de prioridade de certos fluxos como resultado da otimização. Uma estratégia de controle ótimo para a matriz original O-D não é necessariamente ótima para todo o período de controle, pois os valores desta matriz podem ou não ser modificados

durante cada período de controle. A solução para esse problema foi a introdução de um esquema recursivo para que a média dos veículos da matriz O-D se ajuste ao conjunto de sinais ótimos. O controle da rede viária pode ser entendido como uma superposição de controle ou "controladores" em interseções individuais. E como o controle em interseções vizinhas determina o processo de chegada, se pode dizer que o sistema todo é fortemente interconectado.

4.5.1 Interdependência entre filas e controle de interseções

Nas diferentes etapas da otimização o comprimento das filas internas e externas y_{it} é obtido adicionando o saldo entre as novas chegadas e as partidas da fila $y_{i,t-1}$ ao final do intervalo precedente, definido nas restrições abaixo:

$$y_{it} = y_{i,t-1} + a_{it} - x_{it} \quad \forall (i,t) | i \leq M \quad (4.4)$$

$$y_{it} = y_{i,t-1} + \sum_{j=1}^N \beta_{ji,t} x_{jt} - x_{it} \quad \forall (i,t) | i \geq M + 1 \quad (4.5)$$

Onde:

- $a_{i,t}$: demanda veicular que chega através da entrada i durante o tempo t ;
- $x_{i,t}$: veículos partindo da via i no intervalo t ,
- $\beta_{j,i,t}$: taxa de conversão da via j para a via i no intervalo de tempo t ;
- M : representam as vias que ingressam/saem da rede,
- $y_{i,t}$: filas nas vias internas e externas, ao final do intervalo de tempo t .

O percentual de veículos retidos nas filas $D_{i,t}$, é influenciado pelas filas esperando ser atendidas e o fluxo de veículos atendidos, que é calculado como mostrado à seguir:

$$D_{it} = y_{it} / (x_{it} + y_{it}) \quad (4.6)$$

4.5.2 Modelagem das restrições devido a conflitos

O objetivo do sistema de semáforos de trânsito é separar no tempo os conjuntos de movimentos conflitantes, de forma que todos os movimentos possam ser contemplados em algum intervalo de tempo. **O segundo maior grupo de restrições** na otimização resulta

da limitação da capacidade das interseções dada pelos movimentos conflitantes do tráfego, e pelo tempo total considerado em cada interseção para atender separadamente a todos os movimentos em conflito. A modelagem das restrições devido a conflitos se baseia na inequação (4.7) :

$$\sum_{(j,i) \in W_{k,p}} \beta_{j,i,t} x_{j,t} / s_{j,i} \leq d_t (1 - v_{k,p} / c_k) \quad \begin{array}{l} t = 1, \dots, T \\ k = 1, \dots, K \\ p = 1, \dots, L_k \end{array} \quad (4.7)$$

- $X_{j,t}$: veículos partindo da via j no intervalo t ;
- $\beta_{j,i,t}$: taxa de conversão da via j para a via i no intervalo de tempo t ;
- $W_{k,p}$: conjunto p de movimentos conflitantes da interseção k ;
- $S_{j,i}$: fluxo de saturação das conversões da via j para a via i (pcu's/s);
- d_t : duração do intervalo de controle t ;
- $v_{k,p}$: tempo perdido, vermelho total e tempo considerado para pedestres para o conjunto p de movimentos conflitantes da interseção k ;
- c_k : representa o tempo de ciclo para cada interseção k ;
- l_k : número de conjuntos em conflito na interseção k .

Note que o lado direito da desigualdade é igual ao verde efetivamente disponível para cada interseção, e que o lado esquerdo representa o tempo total necessário para atender separadamente cada conjunto de movimentos em conflito naquela interseção.

A modelagem dos movimentos em conflitos de cada interseção inicia-se pela identificação, em cada interseção, de quais são os conjuntos de movimentos que não podem ocorrer simultaneamente (excludentes). Por exemplo, considerando a interseção B (ver Figura 4.1), vê-se que o fluxo da via 6 para a via 2 tem uma faixa exclusiva. Portanto, o único conjunto em conflito é composto pelos fluxos da via 6 para a via 7 e da via 2 para a via 7.

Com respeito ao tempo total considerado em cada interseção, este valor está influenciado pelo tempo de verde efetivo dado aos pedestres mais o vermelho total ou vermelho de segurança. Por exemplo, existem situações em que considerar um tempo de verde para pedestres é necessário, devido a que um fluxo considerável deles pode ser responsável por uma redução significativa no fluxo de saturação. Uma outra situação é

aquela em que a geometria da malha viária não permite a passagem de pedestres e se faz necessária uma pequena temporização para permitir o deslocamento destes. No exemplo, da Figura 4.1, o fluxo de pedestres da via 7 praticamente tem que dispor de um tempo de verde para poder ser atendido, pois os fluxos veiculares, seja o fluxo da via 6 ou da via 2, estão sempre sendo atendidos durante o ciclo. Em ambos os casos, o tempo de verde destinado para pedestres tem que ser determinado antes da modelagem e não é sujeito à otimização.

Por exemplo, consideremos que a interseção da Figura 4.1 tem um ciclo de 100 s e o período de controle T é de 15 minutos (9 ciclos de 100 s). Dadas as características geométricas e o fluxo de pedestres da via 7, considerou-se um tempo de verde efetivo para atender os pedestres de 15 s. Finalmente a modelagem das restrições devido a conflitos baseando-nos na inequação (4.7) obtemos a seguinte inequação:

$$S_{6,7} \cdot \beta_{6,7} \cdot X_6 + S_{2,7} \cdot \beta_{2,7} \cdot X_7 \leq dt_1 - (v_{1,B} - dt_1 / c) \quad (4.8)$$

$$2,6 \cdot (0,40) \cdot X_6 + 2,2 \cdot (1) \cdot X_7 \leq 900 - (15 - 900/100) \quad (4.9)$$

4.5.3 Cálculo dos tempos de verde

O tempo de verde efetivo (por ciclo), que garante o atendimento dos fluxos resultantes da otimização, é obtido multiplicando-se o *headway* de saturação de cada movimento (expressos em segundos por veículos) pela quantidade de veículos, dividindo-se este resultado pelo número de ciclos considerado na modelagem. Caso a via tenha unicamente um fluxo, este tempo de verde efetivo é aquele associado ao tempo de verde efetivo para tratar este único fluxo. Quando uma via possui mais de um fluxo, o cálculo do tempo de verde para atender a estes fluxos exige uma análise do comportamento das restrições devido a conflitos. Como realizar este cálculo será melhor visualizado no próximo capítulo na modelagem da rede viária adotada.

4.6 Conclusões

O método apresentado neste capítulo é usado para a determinação dos sinais de controle para uma rede sobrecarregada. Considerando-se que as chegadas de veículos na rede e a relação O-D do fluxo de tráfego é conhecido *a priori*; e que formuladas via PL. As diferenças na geometria das interseções (número de vias, taxas de conversão, máximo comprimento permitido) foram modeladas como inequações lineares, calculando-se o tempo de verde necessário para cada interseção, assim como o volume permitido de veículos dentro da rede sem violar as restrições de capacidade das vias. No capítulo seguinte se tratará da implementação do algoritmo na interseção sob estudo, assim como se apresentará os tempos de verde efetivos obtidos para cada interseção.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

O objetivo principal deste capítulo é melhorar o desempenho de um conjunto de semáforos fazendo uso do modelo apresentado por EDDELBÜTTEL e CREMER (1994) . Para atingir o objetivo da pesquisa considerou-se como problema de estudo a interseção localizada na entrada do campo universitário da UFSC. Atualmente, esse segmento da malha viária opera com planos de tempo fixo, calculados sem levar em conta aspectos de otimização, o que gera situações de alcance do limite da capacidade de filas envolvendo movimentos de veículos com fluxos altos durante os períodos de pico. Portanto, espera-se com este trabalho obter ganhos substanciais nos tempos de percurso e número de paradas, ao maximizar a quantidade de veículos sendo atendida por ciclo, em horários de saturação da interseção.

5.2 Características da interseção

A área para o estudo dos problemas de otimização é o cruzamento localizado na estrada leste do campos universitário da UFSC, conhecida informalmente como “Rótula da Dona Benta”. Tal interseção está compreendida por quatro conjuntos de conflitos distintos. A Figura. 5.1 mostra a geometria da malha viária e o conjunto de movimentos permitidos na interseção. A interseção atualmente dispõe de dez semáforos operando num mesmo ciclo, e em duas fases com troca simultânea delas (isto é, mesmo *split* para todos) e com *offset* nulo. As características principais do cruzamento são o pequeno espaço para armazenar as filas internas, a necessidade de atendimento aos pedestres, e grande variação dos volumes de tráfego ao longo do dia e da semana, além de variações sazonais importantes durante o ano.

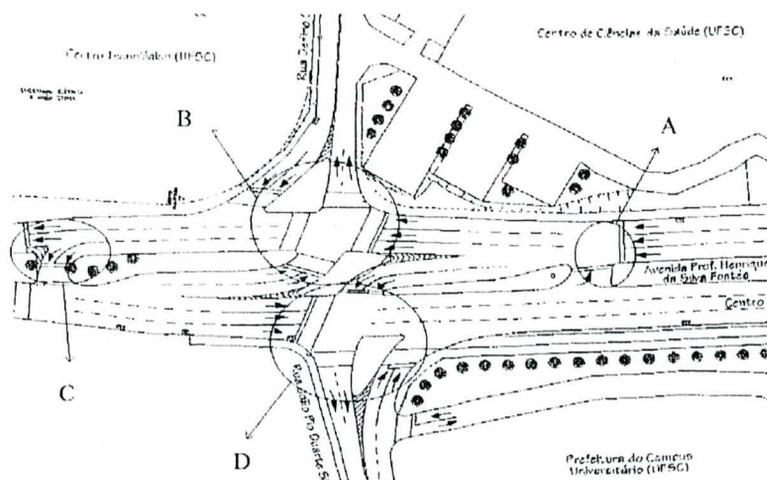


Figura 5.1: Esquema da interseção com destaque para os conflitos existentes (regiões agrupadas como A, B, C, D)

Nas épocas de maior fluxo, que correspondem ao período letivo da UFSC, o fluxo veicular se concentra especialmente nos horários das 8:00 da manhã, 12:00 horas, e 18:00 horas. Para o modelo de estudo se escolheu o horário de pico do meio-dia. Nesta hora, o ciclo é de 65 s, e as fases tem duração de 40 s (para os fluxos Norte-Sul) e 25 s (para os fluxos Leste-Oeste). Baseando-se na geometria e conflitos observados, os dez semáforos foram agrupados em 4 nós - A, B, C, D, como mostrado na Figura 5.2

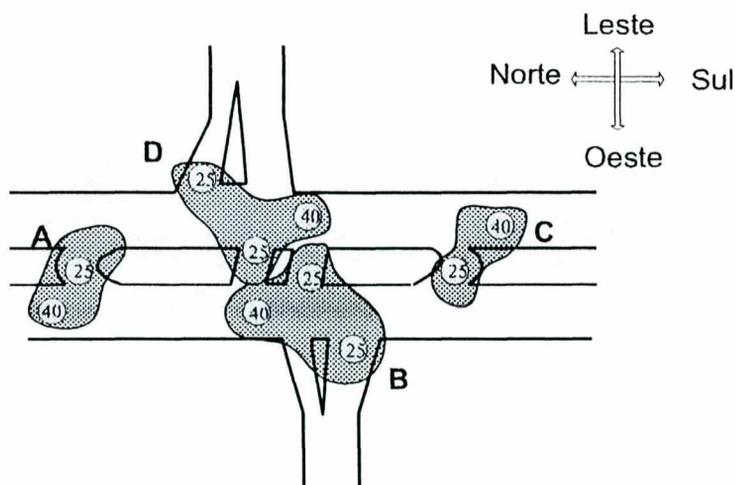


Figura 5.2 Agrupamento dos semáforos na interseção "Dona Benta"

Sendo as diferentes direções dos fluxos veiculares que conectavam cada nó representados por médio de *links*, tratados como vias neste trabalho.

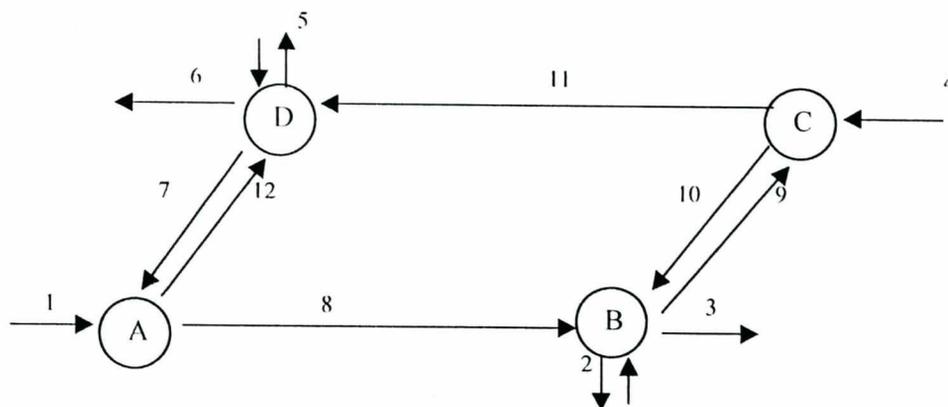


Figura 5.3 Diagrama da rede viária representado por nós e links

A Tabela 5.1 mostra os tempos de verde para cada fase e os movimentos envolvidos em cada uma das fases para cada interseção - A, B, C, D.

Interseção	Tempo verde Fase 1	Fluxos atendidos	Tempo verde fase 2	Fluxos atendidos	Ciclo
A	40 s	1 → 8 1 → 12	25 s	7 → 8	65 s
B	40 s	8 → 2 8 → 3 8 → 9	25 s	10 → 2 2 → 3 2 → 9	65 s
C	40 s	4 → 11 4 → 10	25 s	9 → 11	65 s
D	40 s	11 → 5 11 → 6	25 s	12 → 5 5 → 6 5 → 7	65 s

Tabela 5.1: Tempo de verde para cada fase em cada interseção

5.3 Modelagem da malha viária segundo modelo de otimização

Como citado no Capítulo 4, a numeração das vias mostradas na Figura 5.3 inicia com as vias externas da rede (1 . . . $M = 6$) que representam tanto o ingresso como saída dos veículos. Por exemplo, as vias 2 e 5 registram tanto ingresso como saída do fluxo veicular

da rede; não acontece a mesma coisa com as vias 3 e 6 que unicamente são usadas como vias de saída.

Considerando o tamanho da interseção em estudo, se adotou o tempo de ciclo (c) de 65 s, tempo igual àquele atualmente adotado pelo IPUF. O período de controle considerado foi de 13 minutos (que é igual a 12 ciclos de 65 s) que iniciou ao médio dia, tempo durante o qual unicamente se registrou um plano de chegada de veículos. Para a malha viária sob estudo, considerou-se somente os fluxos de veículos negligenciando os de pedestres

5.3.1 Dados do problema

Existem dois tipos de informações que são tratadas na modelagem: *parâmetros* e *variáveis*. Os primeiros envolvem a geometria da malha viária e as condições de trabalho vigentes, dadas as características da interseção. Estes parâmetros abrangem os fluxos de saturação de cada via, o tempo do ciclo para cada interseção (estes podem ter valores diferentes), o tempo de verde considerado para os pedestres (caso exista um alto fluxo deles), e o tempo perdido considerado para cada interseção dadas as características dos fluxos e de critérios de segurança.

Já as variáveis consideradas na modelagem são a duração do período de controle T e os volumes de tráfego durante este período (planos de chegadas). Os dados de volume devem ser quantificados com respeito à origem e destino dos veículos na rede, assim como as taxas de conversão em cada via. O período de controle T é o **tempo de vigência** dos planos semafóricos calculados, os quais tentam atender à máxima quantidade de veículos que chegam na rede. A divisão do período de controle em subperíodos permite modificar o plano de chegada de veículos durante o período de controle T , gerando novas temporizações semafóricas que melhor se adequem para cada um destes planos. Por exemplo, se dividimos o período de controle T em dois subperíodos (t_1 , t_2), o algoritmo tentará, durante o período de tempo t_1 , alocar a máxima quantidade de veículos. No período t_2 , tentará alocar os veículos remanescentes com uma melhor distribuição dos

tempos de verde. Isto é, se uma determinada via tem demanda de tráfego abaixo da saturação ao longo do período de controle total T , pode acontecer que ela seja atendida totalmente no período t_1 . Assim, no segundo período (t_2) dar-se-á um maior tempo de verde para aquelas vias com um fluxo maior, beneficiando desta forma o desempenho global da rede. A divisão do período de controle em subperíodos permite também o uso de vários modelos de chegada para cada subperíodo, refletindo mais precisamente as diferentes composições dos fluxos das vias.

Como se mencionou no Capítulo 4 o procedimento de otimização de redes congestionadas é realizado em seis etapas. A seguir se abordará o segundo passo, que é calcular a máxima quantidade de veículos que podem ser atendidos na interseção usando Programação Linear.

5.4 Arranjo físico básico do cruzamento

Como mencionado no capítulo 4, o primeiro maior grupo de restrições para a otimização usando a programação linear se baseia na geometria da malha viária. A Tabela 5.2 mostra a máxima fila de veículos (l_i) que pode formar-se em cada via da rede. A inviolabilidade das vias internas na rede é importante para manter o fluxo veicular, dentro da rede, em movimento conforme mostrado na equação (4.1). Já as vias externas podem dispor de uma extensão disponível extra z_i como mostrado na equação (4.2) para que se evitem bloqueios em interseções distantes e fora da malha sob estudo. Mas, devido à elevada capacidade de armazenamento das vias externas, não se considerou esta possibilidade. A modelagem partiu da hipótese da rede estar totalmente vazia; em outras palavras, não há filas formadas nas vias no início do processo de otimização.

Via	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
l_i	200	200	200	200	200	200	15	24	14	14	23	14

Tabela 5.2 Máxima quantidade de veículos em cada via

Numa interseção, uma via pode conter um ou mais fluxos de veículos, cada um dos quais apresentando um fluxo de saturação associado s_j (usualmente expressado em pcu's/h). A Tabela 5.3 mostra os diferentes fluxos de saturação por rota expressados em segundos por veículo (*headway*), onde $h_{i,j}$ é o *headway* de saturação = $1/s_{ij}$. Estes valores aproximados foram obtidos levando em conta tanto fluxo veicular para cada via numa hora assim como as características geométricas da rede viária.

A			B				C			D			
Para→ De↓	8	12	Para→ De↓	2	3	9	Para→ De↓	10	11	Para→ De↓	5	6	7
1	1	2,4	2	-	3	3,2	4	2,8	1,8	5	-	2,8	3,2
7	3,2	-	8	3,2	2	3,2	9	-	3,2	11	3	1,5	-
			10	3,2	-	-				12	3,2	-	-

Tabela 5.3: *headways* da rótula “Dona Benta”.

5.4.1 Chegada dos veículos

No processo de otimização considerou-se unicamente um plano de chegada de veículos, cujo fluxo veicular corresponde ao fluxo registrado durante o período de controle (13 minutos). Já que os trajetos do tráfego que ingressou na rede são conhecidas *a priori*, informação obtida por inspeção do trajeto de cada rota, especificou-se para cada via que faz parte da rede a demanda do fluxo veicular até suas respectivas vias de saída..

A Tabela 5.4 mostra a demanda total de tráfego por rota (origem-destino), assim como o volume total de veículos que pretendem ser atendidos para cada via que ingressa na rede (a_{ij}). Pode ser notado que as vias 3 e 6 não apresentam demanda veicular a ser atendida - entretanto constam como destinos de outras vias; o que não é o caso da via 4, via pela qual unicamente ingressam veículos na rede. Esta tabela permite visualizar o fluxo total de veículos da rede, caso se queira priorizar ou penalizar algum deles.

Origem	Destino						$a_{i,t}$
	1	2	3	4	5	6	
1	-	152	504	-	632	308	1.596
2	-	-	152	-	208	340	700
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	116	-	-	312	268	696
5	-	368	196	-	-	64	628
6	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.4 : Novas chegadas para cada rota da rede em veículos.

A Tabela 5.5 mostra, para cada via, a distribuição do fluxo veicular, expressando-se as taxas de conversão como coeficientes (entre 0.0 a 1.0). Sendo que o fluxo veicular para cada via é resultado do somatório de todas as rotas que passam por essa via. Por exemplo: a interseção A atende aos fluxos que chegam das vias 1 e 7. O fluxo total de veículos que chegam à via 1 é de 1.596 veículos, dos quais aproximadamente 60% dos veículos se dirigirão à via 8, direcionando-se o fluxo restante para a via 12. A Tabela 5.5 também permite detectar possíveis gargalos e o nível de demanda do fluxo veicular para cada via.

A			B			C			D				
Para→ De↓	8	12	Para→ De↓	2	3	9	Para→ De↓	10	11	Para→ De↓	5	6	7
1	964 ,60	632 ,40	2	-	152 ,22	548 ,78	4	116 ,16	580 ,84	5	-	64 ,10	564 ,90
7	564 1,0		8	520 ,34	700 ,46	308 ,20	9	-	856 1,0	11	520 ,36	916 ,64	-
			10	116 1,0						12	632 1,0		

Tabela 5.5: Volume total de veículos e distribuição inicial de fluxos.

5.4.2 Formação de fila numa via

A formação de filas internas e externas está limitada segundo a fila máxima de veículos permitidos em cada via. Como mencionado no Capítulo 4 (Eq. 4.1 e 4.4), a fila interna na via i ao final do período t que se está controlando ($y_{i,t}$), é obtida adicionando-se à fila formada naquela via no período anterior ($y_{i,t-1}$) o balanceamento entre as novas

chegadas e partidas de veículos naquela via. A partir da equação (4.4), as filas internas ao longo do período controlado t são dadas por:

$$y_{it} = y_{i0} + \sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{j=1}^N \beta_{ji\tau} \cdot x_{j\tau} - x_{i\tau} \right) \quad \forall (i,t) | i \leq M+1 \quad (5.1)$$

De acordo com a restrição (4.1) $0 \leq y_{it} \leq l_i, \forall (i,t) | M+1, ,$ que diz respeito à máxima fila permitida naquela via, obtém-se:

$$y_{i0} - l_i \leq \sum_{\tau=1}^t \left(x_{i\tau} - \sum_{j=1}^N \beta_{ji\tau} x_{j\tau} \right) \leq y_{i0} \quad \begin{array}{l} i = M+1, \dots, N \\ t = 1, \dots, T \end{array} \quad (5.2)$$

Onde:

- M = número de entradas e saídas da rede;
- N = número de vias na rede, incluído entradas
- T = período de controle
- $y_{i,t}$ = fila na via i ao final do período de controle t ;
- l_i = máximo número de veículos na via i ;
- $\beta_{j,i}$ = taxa de conversão da via j para a via i ;
- $x_{i,t}$ = veículos partindo do link i durante o intervalo t ;

A desigualdade. (5.2) descreve a restrição de capacidade de filas a ser obedecida pelo programa de Programação Linear para as vias internas, visando não violar a capacidade de armazenamento das mesmas. Na próxima seção, modelar-se-á as restrições de alocação de veículos durante um período de controle levando-se em conta os conflitos de cada interseção.

5.4.3 Modelagem das restrições devido a conflitos

O objetivo de sinalizar as interseções, é separar no tempo os conjuntos de movimentos conflitantes, garantindo que cada um destes fluxos contará com uma parcela de tempo para serem atendidos. É por esse motivo que a modelagem das restrições de tempo para cada interseção é feita **unicamente** com aqueles fluxos que são conflitantes entre si.

A modelagem das restrições devido a conflitos se baseia na desigualdade:

$$\sum_{(j,i) \in W_{kp}} \beta_{ji} x_{ji} / s_{ji} \leq d_t (1 - v_{kp} / c_k) \quad \begin{array}{l} t = 1, \dots, T \\ k = 1, \dots, K \\ p = 1, \dots, L_k \end{array} \quad (5.3)$$

cujo lado direito da desigualdade representa o verde efetivo, e o lado esquerdo representa o tempo total necessário para atender separadamente a todos os movimentos em conflito de cada interseção (ver notação na desigualdade. 4.6).

Para o período de controle foram considerados 12 ciclos de 65 segundos, e 5 s como tempo perdido pelos motoristas até que reajam ao sinal do semáforo. Conforme citado no Capítulo 4 (seção 4.5.1), este tempo não está sujeito a otimização. Por este motivo, a proporção do tempo perdido é descontada do período de controle, sendo adicionada proporcionalmente depois do processo de otimização a cada fase do ciclo da interseção.

Como exemplo de aplicação se modelará as restrições de conflitos de cada uma das interseções onde:

- $h_{i,j}$ = é o *headway* de saturação da via i para a via j ($h_{i,j} = 1/s_{i,j}$);
- $\beta_{j,i}$ = taxa de conversão da via j para a via i
- $x_{i,t}$ = veículos partindo do *link* i durante o intervalo t ;

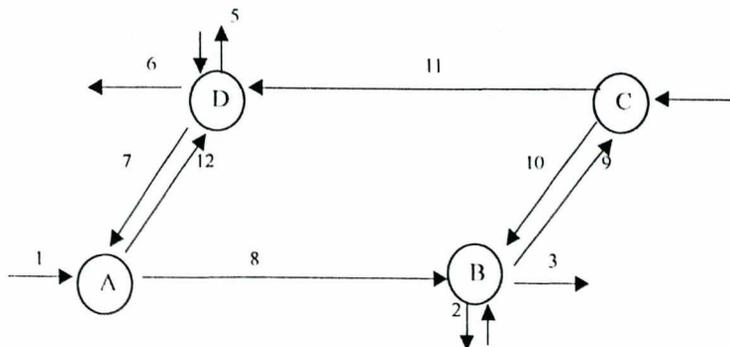


Figura 5.3 Diagrama da rede viária representado por nós e links

Considera-se a interseção A (Observar Figura 5.3), a qual possui dois conjuntos de movimentos conflitantes. A partir da desigualdade. (5.3), tem-se:

$$(h_{1,8} \cdot \beta_{1,8} + h_{1,12} \cdot \beta_{1,12}) \mathbf{X}_1 + h_{7,8} \cdot \beta_{7,8} \mathbf{X}_7 \leq 780 - 5 * 780 / 65 = 720 \text{ s} \quad (5.4)$$

A primeira parcela esquerda da inequação (5.4) é composta pelos fluxos que partem da via 1 às vias 8 e 12; o segundo conjunto é composto unicamente pelo fluxo que parte da via 7 para a via 8.

A interseção B, possui três conjuntos de movimentos nem todos conflitantes entre si, modelados em duas desigualdades:

$$(h_{8,2} \cdot \beta_{8,2} + h_{8,3} \cdot \beta_{8,3} + h_{8,9} \cdot \beta_{8,9}) \mathbf{X}_8 + (h_{10,2} \cdot \beta_{10,2}) \mathbf{X}_{10} \leq 780 - 5 \cdot 780 / 65 = 720 \text{ s} \quad (5.5)$$

$$(h_{8,3} \cdot \beta_{8,3} + h_{8,9} \cdot \beta_{8,9}) \mathbf{X}_8 + (h_{2,9} \cdot \beta_{2,9} + h_{2,3} \cdot \beta_{2,3}) \mathbf{X}_2 \leq 780 - 5 \cdot 780 / 65 = 720 \text{ s} \quad (5.6)$$

Na primeira desigualdade (5.5) considerou-se os conjuntos de movimentos que partem das vias 8 e 10. Já que o conjunto de movimentos da via 2 está parcialmente em conflito com parte dos fluxos da via 8, estes foram modelados numa segunda desigualdade (5.6).

A interseção C, tem dois conjuntos de movimento conflitantes equacionados como:

$$(h_{4,11} \cdot \beta_{4,11} + h_{4,10} \cdot \beta_{4,10}) \mathbf{X}_4 + (h_{9,11} \cdot \beta_{9,11}) \mathbf{X}_9 \leq 780 - 5 \cdot 780 / 65 = 720 \text{ s} \quad (5.7)$$

O primeiro conjunto de movimentos partindo da via 4, e estão compostos pelos fluxos de 4 à 11 e de 4 à 10. O segundo conjunto está composto pelo fluxo de veículos que parte da via 9 à 11.

Finalmente na interseção D, assim como na interseção B, a modelagem foi feita em duas desigualdades dado que os fluxos que partem da via 5 não são conflitantes com o fluxo que parte da via 12.

$$(h_{5,7} \cdot \beta_{5,7} + h_{5,6} \cdot \beta_{5,6}) \mathbf{X}_5 + (h_{11,6} \cdot \beta_{11,6}) \mathbf{X}_{11} \leq 780 - 5.780/65 = 720 \text{ s} \quad (5.8)$$

$$(h_{11,5} \cdot \beta_{11,5} + h_{11,6} \cdot \beta_{11,6}) \mathbf{X}_{11} + (h_{12,5} \cdot \beta_{12,5}) \mathbf{X}_{12} \leq 780 - 5.780/65 = 720 \text{ s} \quad (5.9)$$

Como se pode observar das desigualdades, na modelagem não se levou em conta o comportamento descontínuo da aceleração dos veículos, nem a velocidade e o espaço entre eles, considerados parâmetros não relevantes para a avaliação do atraso. Isto se deve ao comportamento periódico do atraso depender muito do número de veículos que são descarregados da fila durante o tempo de verde.

5.5 Ferramenta de implementação e metodologia.

A ferramenta que serviu de plataforma para a construção do modelo foi o **Matlab** versão 5.3, *software* bastante utilizado para a modelagem e simulação de sistemas devido a sua flexibilidade para implementar estratégias de controle e otimização comparável àquelas oferecidas pelas linguagens de programação convencionais. A disponibilidade de algoritmos de programação linear em seu *toolbox* facilitou a programação do algoritmo e simulação do mesmo.

5.6 Resultados obtidos

Na simulação realizada, o modelo não considerou o fluxo de pedestres. O tempo de controle foi definido como $T = 12$ ciclos de 65 segundos = 780 s (13 minutos). O tempo perdido pelos motoristas foi definido em 5 s. A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos

Fluxo total que ingressa na rede	via	Cap. da via em veículos, l_i	Fluxo atendido, x_{it}	Fila em espera formada, $y_{i,t}$	Percentual de atraso, $D_{i,t}$
1596	1	200	252,7	1343,3	84,2
700	2	200	113,9	586,1	83,7
-	3	200	-	-	-
696	4	200	168,1	527,9	75,8
628	5	200	130,6	497,4	79,2
-	6	200	-	-	-
564	7	15	102,3	15,0	12,8
1528	8	24	230,9	24,0	9,4
856	9	14	121,7	14,0	10,3
116	10	14	28	-	-
1436	11	23	238,8	23,0	8,8
632	12	14	86,1	14,0	14,0

Tabela 5.6: Fluxo Total atendido: 1.473,1 veículos.

A primeira coluna da Tabela 5.5 mostra a demanda total do fluxo veicular que pretende-se atender durante 13 minutos em cada via. A terceira coluna apresenta os fluxos atendidos em cada via calculados pelo algoritmo adotado. As filas em espera formadas em cada via são mostradas na quarta coluna. O percentual de veículos retidos nas filas é mostrado na quinta coluna e foi obtido via equação (4.5). Na quarta coluna pode-se observar que as entradas externas encontram-se saturadas (resultado esperado dada a alta demanda de tráfego), e que quase todas as vias internas estão com as filas alocadas na capacidade máxima, com apenas a via 10 apresentando folga na sua capacidade, resultado da pouca demanda de tráfego nesta via.

A distribuição do fluxo veicular atendido por cada via é obtida ao multiplicar o fluxo atendido x_{it} mostrado na Tabela 5.6 com suas correspondentes taxas de conversão extraídas da Tabela 5.3. Esta distribuição é mostrada na Tabela 5.7.

A			B				C			D			
Para→ De↓	8	12	Para→ De↓	2	3	9	Para→ De↓	10	11	Para→ De↓	5	6	7
1	152,6 ,60	100 ,40	2	-	24,7 ,22	89,1 ,78	4	28,07 ,17	140 ,83	5	-	13,32 ,10	117,3 ,90
7	102,3 1,0	-	8	78,5 ,34	105,7 ,46	46,41 ,20	9	-	121,7 1,00	11	86,44 ,36	152,4 ,64	-
			10	28 1,0	-	-				12	86,1 1,0		

Tabela 5.7 Volume de veículos derivado da solução inicial da PL

O tempo de verde efetivo (por ciclo), que garante que cada um destes fluxos é atendido, é obtido multiplicando-se o *headway* de saturação de cada movimento (expressados em segundos por veículos) pela quantidade de veículos que aloca e dividindo-se este resultado pelo número de ciclos considerado na modelagem. Por exemplo, o tempo de verde efetivo para o fluxo da via 8 à via 2 é calculado como segue:

$$\begin{aligned}
 \text{Tempo de verde efetivo do fluxo } 8 \rightarrow 2 &= (h_{8,2} * \beta_{8,2} * X_8) / n \text{ (ciclos)} \\
 &= (3,2 * 0,34 * 230,9) / 12 \\
 &= 20,93 \text{ s}
 \end{aligned}$$

A Tabela 5.8 mostra o tempo de verde efetivo para cada fluxo:

A			B				C			D			
Para→ De↓	8	12	Para→ De↓	2	3	9	Para→ De↓	10	11	Para→ De↓	5	6	7
1	12,70	20	2	-	6,17	23,76	4	6,54	21	5	-	3,10	31,27
7	27,28	-	8	20,93	17,55	12,37	9	-	32,45	11	21,60	19,04	-
			10	7,5	-	-				12	22,96	-	-

Tabela 5.8 : Tempos de verde efetivo obtidos para cada fluxo.

Quando uma via tem unicamente um fluxo, o tempo de verde efetivo para aquela via está associado ao tempo de verde efetivo para tratar este único fluxo. Quando uma via possui mais de um fluxo, o cálculo do tempo de verde para atender a estes fluxos exige

uma análise do comportamento dos fluxos na mesma (restrições devido a conflitos). Por exemplo, consideremos a interseção B (ver Figura 5.3 (a)); como pode ser observado, a via 8 possui três fluxos, para cada um dos quais o tempo de verde efetivo foi calculado. Considerou-se que o fluxo da via 8 para 2 dispõe de uma faixa exclusiva para seu atendimento.

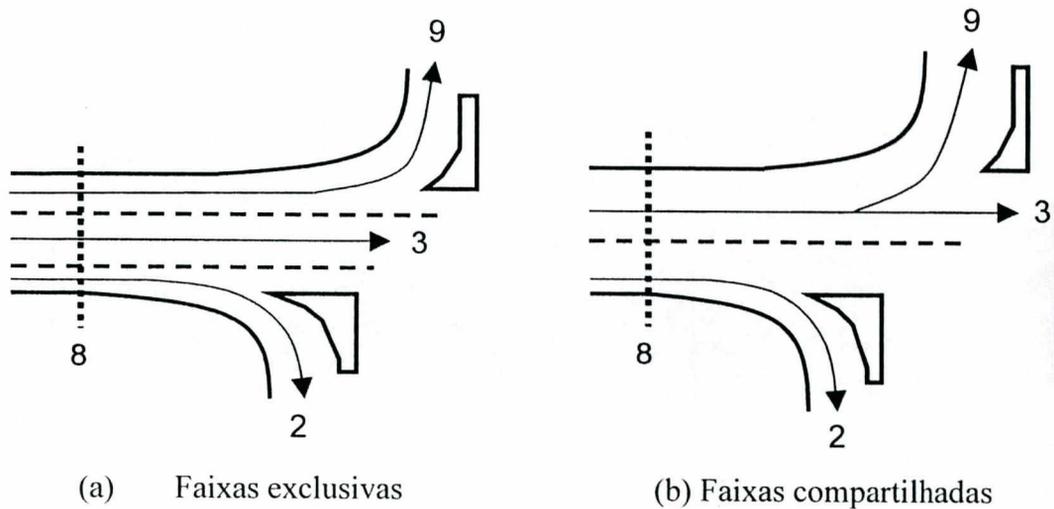


Figura 5.3: Interseção B.

Por outro lado os fluxos da via 8 para 3 e 8 para 9, por seus turnos, não tem faixas exclusivas, sendo que durante seus trajetos se misturam formando um tráfego misto a ser atendido (ver Figura 5.3 (b)). O cálculo do tempo de verde efetivo para atender totalmente a este tráfego misto está dado pelo somatório dos tempos de verde efetivo de cada rota que compartilha uma ou mais faixas (tempo de verde obtido das restrições devido a conflitos, que considerou estes fluxos como compartilhados). O tempo de verde efetivo para atender estes dois fluxos foi 29,9 s *versus* 20,9 s para atender o fluxo da via 8 para 2. Como o percurso dos veículos do fluxo da via 8 à 2 transcorre simultaneamente com os outros fluxos e ele sai do sistema, o tempo de verde efetivo que ele precisa pode ser alterado a favor de um outro maior. Se este fluxo ingressasse ao sistema, o tempo obtido para ele teria que ser respeitado para não violar a capacidade das filas internas. Então o tempo de verde efetivo na primeira fase para o conjunto de movimentos da via 8 é 29,9.s

Os segundo conjunto de movimentos, a ser atendidos numa segunda fase, são aqueles que partem da via 10 e da via 2 (como foi modelado nas restrições devido a conflitos). Para o fluxo da via 10 a 2, que sai do sistema, o tempo de verde efetivo é igual a 7,5 s. Já para a via 2 o tempo de verde efetivo é igual ao somatório dos tempos de verde efetivo de cada um dos fluxos que compartilham vias (29,9 s). Considerando que o fluxo da via 10 para 2 sai do sistema, e que este tempo pode ser alterado a favor de um outro tempo de verde maior. O tempo de verde efetivo nesta segunda fase é igual a 29,9 s. Como se pode observar o somatório destas duas fases é de 59,85 s devido a que o tempo perdido de cinco segundos não foi considerado no processo de otimização.

Esta mesma análise é feita para cada interseção. A Tabela 5.9 mostra os tempos de verde efetivo para cada conjunto de movimentos.

Interseção	Tempo verde fase 1	Fluxos atendidos	Tempo verde fase 2	Fluxos atendidos	Total
A	32,7 s	1 → 8 1 → 12	27,3 s	7 → 8	60,0 s
B	29,9 s	8 → 2 8 → 3 8 → 9	29,9 s	10 → 2 2 → 3 2 → 9	59,8 s
C	27,5 s	4 → 11 4 → 10	32,5 s	9 → 11	60,0 s
D	22,0 s	11 → 5 11 → 6	34,3 s	12 → 5 5 → 6 5 → 7	56,3 s

Tabela 5.9. Tempos de verde para cada conjunto de movimentos.

Como se assumiu que a demanda é determinística e constante, o comprimento das filas em cada movimento pode crescer até o limite dado pela capacidade de armazenamento da fila para não bloquear o livre deslocamento dos fluxos restantes. Por conseguinte, a diferença entre a quantidade de veículos que chega e a que é atendida na via i deve ser menor ou igual a l_i .

5.7 Comparação com a temporização atual

Para comparar os resultados obtidos com a temporização atualmente adotada para a interseção, deve-se fazer algumas hipóteses. Primeiramente, assume-se que as filas internas podem acomodar veículos para além de suas capacidades (chamadas “filas verticais” na literatura; ver VINCENT (1980), p.ex.). Isto poderá resultar numa violação das restrições de filas; o valor percentual desta violação será utilizado como indicativo da qualidade da temporização adotada (quanto maior este percentual, pior é a política de tempos).

Em segundo lugar, para fins de simplificação, escolhe-se sempre uma fila que seja alimentada unicamente por um movimento que tenha como origem um fluxo externo. A exceção fica por conta da fila formada na via 9, a qual será discutida posteriormente.

Partindo da primeira hipótese, o volume que ingressa numa via é dado pela expressão:

$$FI_i = \min \left\{ v_i, \sum_{j=1}^N g_{ji} * s_{ji} \right\} \quad (5.10)$$

onde v_i é a demanda de ingresso na via, $g_{j,i}$ é o verde efetivo total ao longo do período de controle considerado e $s_{j,i}$ é o fluxo de saturação em pcu/s. A Eq. (5.10) indica que o volume que ingressa na via i está limitado pelo verde efetivo de acesso à via.

Já o fluxo efetivamente descarregado da fila na via i é dado por:

$$FA_i = g_i * s_i \quad (5.11)$$

onde g_i é o tempo de verde efetivo para o período de controle e s_i é o fluxo de saturação de descarga da fila. A fila acumulada na via i é obtida pela subtração destes dois valores:

$$q_i = FI_i - FA_i \quad (5.12)$$

Por exemplo, a fila máxima que pode ser formada na via 12 é de 14 pcu's. Aplicando os tempos atualmente empregados na interseção, o fluxo total atendido pela via 1 resulta em 285 pcu's, dos quais 60.4 % se dirigem para a via 8 (172 pcu's) e 39.6 % para

a via 12 (113 pcu's). Os tempos de verde empregados são mostrados na Tabela 5.1. A demanda veicular total da via 12 durante o período de controle é de 632 pcu's (Tabela 5.5), sendo o único fluxo veicular que nela ingressa o fluxo proveniente da via 1. Da Eq. (5.10), o volume de veículos que ingressa na via 12 é de $FI_{12} = 113$ pcu's. A quantidade efetivamente descarregada é dada pela Eq. (5.11), sendo $FA_{12} = 86$ pcu's. Então, a fila formada na via 12 é de $q_{12} = 27$ pcu's. A violação da capacidade da fila resulta em 92,9 %

As Tabelas a seguir mostram o percentual de violação encontrado para cada fluxo analisado.

Interseção A

Interseção	Tempo de:	Fluxo $i \rightarrow j$	Demanda Via j	Fluxo que ingressa em j	Max. Fluxo Atendido por j	Fila Formada Em j	Violação da fila (%)
A	Alg.	1 → 12	632	100	86	14	0,0
	T.Atual			113	86	27	92,9

Tabela 5.10 Percentual de violação das filas formadas :tempos do algoritmo e temporização atualmente usada

Como se pode observar na Tabela 5.10 a demanda veicular durante o período de controle de 13 minutos é de 632 veículos. Com os tempos obtidos a partir do algoritmo a interseção A atende 100 veículos, sendo que a interseção D com um tempo de 23 s somente pode atender 86 veículos, o que origina a formação de uma fila na via 12 de 14 veículos (sendo 14 a máxima capacidade de veículos permitidos). Com os tempos atuais a fila formada na via 12 é de 27 veículos, valor que viola as restrições de capacidade em 92,9 % .

Interseção B

Na Tabela 5.11, na interseção B, o fluxo analisado é aquele da via 9 que é alimentado pelo fluxos que partem das vias 8 e 2. Sendo a demanda veicular registrada durante o período de controle é de 856 veículos.

Interseção	Tempo de:	Fluxo $i \rightarrow j$	Demanda Via j	Fluxo que ingressa em j	Max. Fluxo atendido por j	Fila formada em j	Violação da fila(*) (%)
B	Alg.	2→9	856	89	121	14	0,0
		8→9		46			
	T. Atual	2→9		68,33	86	26	89
		8→9		44,3			

Tabela 5.11 Percentual de violação das filas formadas :tempos do algoritmo e temporização atualmente usada

Com os tempos do algoritmo se registrou um ingresso de veículos na interseção C de 135 veículos, sendo efetivamente atendidos 121 o que originou uma fila de 14 veículos (máxima fila permitida na via 9). Com os tempos atualmente aplicados ingressarão 112 veículos, sendo atendidos na interseção C unicamente 86 veículos a violação da restrição de capacidade é de 89 %

Interseção C

Interseção	Tempo de:	Fluxo $i \rightarrow j$	Demanda Via j	Fluxo que ingressa em j	Max. Fluxo Atendido por j	Fila Formada Em j	Violação da fila (%)
C	Alg.	4→10	16	28	28	0	-
	T.Atual			38	86	0	-

Tabela 5.12 Percentual de violação das filas formadas :tempos do algoritmo e temporização atualmente usada

O fluxo veicular atendido pela interseção C, obtido do algoritmo é de 28 veículos, os quais são totalmente atendidos na interseção D não formando fila alguma, como se pode observar na Tabela 5.12 não se registra violação da capacidade armazenamento a via 11 mais se uma sub-utilização da via em outras palavras a demanda é menor que a capacidade de atendimento da via. O tempos atuais aplicados na rótula registram um ligeiro aumento dos veículos atendidos pela interseção C. Entretanto um número significativamente

elevado pode ser atendido pela interseção D (86 veículos) o que mostra uma clara sub-utilização dos tempos destinados para os fluxos, já que afeta aos fluxos que estão esperando ser atendidos pela interseção D.

Interseção D

Interseção	Tempo de:	Fluxo $l \rightarrow j$	Demanda Via j	Fluxo que ingressa em j	Max. Fluxo Atendido por j	Fila Formada Em j	Violação da fila (%)
D	Alg.	5→7	564	117	102	15	0,0
	T.Atual			87	86	1	-92

Tabela 5.13 Percentual de violação das filas formadas :tempos do algoritmo e temporização atualmente usada

A demanda do fluxo veicular da via 7 é de 564 veículos, com os resultados do algoritmo tem-se que ingressaram 117 veículos (atendidos pela interseção D), sendo atendidos pela interseção A unicamente 102 deles formando uma fila de 15 veículos. Com os tempos atuais, a quantidade de veículos que ingressaram na via 7 foi de 86 veículos dos quais unicamente 1 não foi atendido pela interseção A. O que mostra uma sub-utilização da capacidade de armazenamento da via 7 devido que uma maior quantidade de veículos poderiam ter sido atendidos pela interseção D.

5.8 Conclusão

Neste capítulo, se abordou a otimização de um cruzamento composto por quatro interseções, que apresentam problemas de temporização durante os horários de pico. Foi feita a modelagem para uso em algoritmo de Programação Linear considerando-se as restrições geométricas das vias e os conflitos de movimentos. Estes expressam a limitação para cada via da quantidade de veículos que podem esperar nas filas e a divisão dos tempos para satisfazer os movimentos conflitantes. Considerou-se também a caracterização dos fluxos na via (fluxo de saturação), e demanda veicular. Do ponto de vista das variáveis de

temporização, considerou-se valores típicos para o tempo de ciclo, tempo perdido e vermelho total.

Os resultados obtidos do algoritmo garantem a máxima quantidade de veículos que podem ser alocados pelas vias, levando em conta todas as restrições e, por conseguinte, não bloqueando as vias internas na rede. O algoritmo foi desenvolvido em programação linear usando o *Matlab*. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos fazendo uso dos tempos atualmente adotados para a interseção, cuja performance mostrou-se muito aquém do fornecido pelo algoritmo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Este trabalho representou uma continuação das pesquisas de controle de tráfego no Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da UFSC, iniciadas por Mascarenhas (1998), na qual se abordou o controle do tráfego em interseções isoladas. Já o presente trabalho abrangeu o estudo de uma rede de tráfego, as variáveis envolvidas no comportamento da mesma, assim como políticas de controle em condições de congestionamento.

Numa primeira etapa deste trabalho, para uma melhor compreensão do problema a ser abordado, se estudou o programa *Transyt*, através da implementação de modelos do trecho da malha viária que se pretendeu analisar e controlar. A modelagem incluiu diferentes horários, simulando-se o comportamento do trecho sob estudo e otimizando o desempenho para casos sem problemas de saturação. Deste estudo, conclui-se pela impraticabilidade do uso da ferramenta *Transyt* em horários de congestionamento.

A partir daí, a otimização de sinais numa interseções isoladas submetidas a condições de congestionamento foi estudada com um algoritmo de Programação Linear, aplicando-se modelos de restrição lineares para formular um programa matemático de temporização dos semáforos. O objeto de estudo foi o mesmo trecho da malha viária abordado com o *Transyt*, consistindo de uma pequena rede de semáforos localizada numa das entradas do campus da UFSC (“rótula da D. Benta”). O algoritmo implementado foi proposto por Edellbüttel (1994), o qual limita o ingresso de veículos na rede caso se violem as restrições das filas internas, levando em conta as restrições de capacidade de cada via numa interseção.

A utilização do algoritmo na rótula mostrou a superioridade de desempenho, nas mesmas condições, da solução obtida por Programação Linear daquela que se obtém com os tempos atualmente utilizados. Estes provocam violações em restrições de algumas filas em torno de 90%, enquanto outras filas são sub-utilizadas devido à deficiência dos tempos.

Este trabalho deixa em aberto perspectivas para trabalhos futuros, dentre os quais pode-se apontar: (i) o estudo e implementação de políticas de *offset* para aquelas interseções que não são críticas, mas que abrangem a área de controle, esperando-se melhorar mais o desempenho da rede como um todo, (ii) o teste das estratégias em simuladores de tráfego melhor adaptados para simular os efeitos reais do tráfego (tais como políticas de aceleração/frenagem), e (iii) a extensão do algoritmo para uso em tempo real.

Referências Bibliografias.

1. [Allsop, 1971] "A Computer Program for Calculating Traffic Signal Settings", *Traffic Engineering and Control*, 13(2), pp. 58-60.
2. [Bell, 1993] M G H. Bell, D Brookes, "Discrete Time-Adaptative Traffic Signal control: the Calculation of Expected Delays and Stops ", *Transpn. Res-C vol IC*, No. 1, pp. 43-55.
3. [Branston, 1979] D. Branston, "Some factors affecting the capacity of signalized intersections", *Traffic. Engng Control*, No 20, pp 390-396.
4. [Cal *et al*, 1995] R. Cal y Mayor, J. G. Cárdenas, "Ingenieria de Tránsito -Fundamentos y Aplicaciones" Alfaomega Grupo Editor, Mexico, D.F.
5. [Crabtree, 1996] M R. Crabtree, R A Vincet, S. Harrison, "Transyt/10 User Guide", Transport and Research Laboratory", TRRL Laboratory Application Guide 28, Crowthorne, Inglaterra.
6. [Daganzo, 1998] "Daganzo, "A Simple, Generalized Method for Analysis of a Traffic Queue Upstream of a Bottleneck", *Transportation Research Record*, Paper No 981292
7. [D'Ans, 1976] C. Gazis, "Optimal Control of Oversaturated Store-and Forward Transportation Networks", *Transportation Science*, No 10, pp 1-19.
8. [Eddelbüttel e Cremer, 1994] J. Eddelbüttel, M. Cremer "A New Algorithm for Optimal Signal Control in Congested Network", *Journal of Advanced Transportation*, Vol 28, No 3, pp 275-297.
9. [Farges, 2000] J. L Farges, W. Kraus Jr (2000). "Efeito do Offset no Comprimento de Filas em Interseções com Tráfego Saturado". Submetido ao XIII Congresso da Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes - ANPET. Gramado, RS.

10. [Gazis, 1974] D. C. Gazis "Optimum Control a System of Oversaturated Intersections", *Operations Research*, No 12,1964, pp 815-831.
11. [Henry *et al*, 1983] J. J. Henry, J. L Farges, J Tuffal, "The PRODYN Real Time Traffic Algorithm" Proceeding of the 4th IFAC-IFIP-IFORS Conference on Control in Transportation System, VDI/VDE: Duesseldorf, Germany, pp 307-311.
12. [Holroyd, 1971] R. Holroyd, "The Glasgow experiment: PLIDENT and after. RRL Report , LR 384", Department of the Environment, Road Research Laboratory, Crowthorne.
13. [Iftar, 1998] Iftar, "A Linear Programming Based Decentralized Routing Conrolller for Congested Highways", *Automatica*, No, 35, pp. 279-292.
14. [ITE, 1995] *Improving Traffic Signal Operations*,.ITE, Washington,USA.
15. [Kirby, 1992] H. R. Kirby, "Transport Research at the University of Leeds: Report for 1991" *Traffic Engineering and Control*. vol 33, No.3, pp. 171-178.
16. [Impronta, 1984] G. Impronta, G.E, Cantarella, "Control System Design for an Individual Signalized Juntion", *Transpn. Res-B* vol 18B, No. 2, pp. 147-167.
17. [Lieberman, 1990] E B, Lieberman, "Concepts of Control for Oversaturated Network", Presented at TRB Traffic signal Systems Committe Meeting, Minneapolis, Minn., 1990
18. [Lindley, 1992] A.J. Lindley, D. G. Cappelé, "Freeway Surveillance and Control", *Traffic Engineering Handbook*, 4th ed. J. L. Pline, ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
19. [McShane and Roess, 1990] R. W, McShane,R. P, Roess. "Traffic Engineering", Prentice-Hall, EngleWood Cliffs, N.J 1990 Chapter 30.
20. [Mascarenhas, 1997] R. Mascarenhas de Brito, "Desenvolvimento de um Simulador para Análise e Projeto de Sistemas de Controle de Trafego em Malha Fechada ". Dissertação de mestrado. Departamento de Eng. Elétrica. UFSC. Florianopolis,1997
21. [Mahalel *et al*, 1991] D. Mahalel. Y. Gur, "Optimal operation of a Critical Intersection (in Hebrew). Research Report. *Transportation Research Institute*, Technion, Haifa, Israel.
22. [May, 1990] May. "Traffic Flows Fundamentals", Pretince Hall Inc. Englewoods Cliffs, New Jersey ,E.U.A.

23. [Magalhães, 1997] D. de Magalhães, M. V. Soares, L. Gontijo, "Determinação Empírica do Fluxo de Saturação e Diagnóstico de Congestionamento do Tráfego Urbano", XIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, vol 1, pp. 29-38.
24. [Mauro *et al.*, 1989] V. Mauro, C. Di Taranto, UTOPIA. "6th IFAC-IFIP-IFORS Conference on Control, Computers, Communications in Transport, Paris.
25. [Merino, 1999] E. Merino, J. E. Leal, "Modelos de Optimización de Rutas de Transporte Público por Autobús: Um Análisis Evolutivo y Crítico", XIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, vol 1, pp. 343-354.
26. [Michael, 1993] G.H. Michael, D. Brookes, "Discrete Time-Adaptive Traffic Signal Control: the Calculation of Expected Delays and Stops", *Transpn. Res-C vol 1C*, No 1, pp. 43-55.
27. [Michalopoulos, 1978] P. G. Michalopoulos, G. Stephanopoulos, "Optimal Control of Oversaturated Intersection: Theoretical and Practical Considerations", *Traffic Engineering and Control*, vol 19, No. 5, 1978, pp. 216-222.
28. [Michalopoulos, 1979] P. G. Michalopoulos, G. Stephanopoulos "An Algorithm for Real-Time Control of Critical Intersection", *Operations Research* vol 1, pp. 9-15.
29. [Miller, 1963] A. J. Miller, "Setting for Fixed-Cycle Traffic Signal", *Operations Research Quarterly*, 14, pp. 373-386.
30. [Portugal e Silva, 1993] L. S. Portugal, P. C. M. Silva, "Modelagem do Comportamento dos fluxos de Ônibus no Transyt", Anais do VII Congresso de Ensino e pesquisa em Transportes, ANPET, Recife, vol. 2, pp. 810-820.
31. [Prashker, 1994] J. N. Prashker, I. Gal-Tzur, D. Mahalel "Signal Design for Congested Networks Based on Metering", *Transpn. Research Record* vol. , No. , pp.111-118.
32. [Rouphail, 1997] N. Rouphail, "Traffic flow at signalized intersections", *Transpn. Research Board (eds) Traffic Flow Theory -The State of the art .TRB*, National Research Council, Washington, DC.
33. [Singh e Tamura, 1974] M. G. Singh, H. Tamura, "Modelling and Hierarchical Optimization for Oversaturated Urban Road Traffic Network", *International Journal of Control*, vol 20, No.6,1974, pp.913-934.
34. [Strobel, 1982] H. Strobel, "Computer Controlled Urban Transportation", publicação Chichester: J. Wiley, 1982

35. [Taylor, 1996] M. A. P. Taylor, W. Young, P. W.V Bonsal , “Understanding Traffic System: Data, Analysis and Presentation” Avebury Technical, Cambridge, Inglaterra.
36. [Yagar, 1974] S. Yagar, “Capacity of a Signalized Road Junction Critique and Extensions”, *Transpn. Res-C vol 8*, pp. 137-147.
37. [Yagar, 1977] S. Yagar, “Minimizing Delay for Transient Demands with Application to Signalized Road Junctions”, *Transpn. Res-C vol 11*, pp. 53-62.
38. [Vincent, 1980] R. A. Vincent, A. I. Mitchell, D. I. Robertson, “User guide to Transyt version 8”, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 888, Crowthorne, Inglaterra.
39. [Webster, 1966] F. V. Webster, B. M. Cobbe, “Traffic Signal”, *Road Research Technical paper*, 56, HSMO, London.
40. [Wong, 1995] S. C. Wong, “Derivatives of the Performance Index for the Traffic Model From Transyt”, *Transportation Research B*, 29, No 5, pp. 303-319.
41. [Wong, 1996] S. C. Wong, “Group-Based Optimisation of Signal Timing Using the Transyt Traffic Model”, *Transportation Research B*, 30, pp. 217-244.
42. [Zanuz, 1997] A. Zanuz, R. J. Rossetti, S. Bampi “Modelo de um Sistema para Integração de Simulação e Supervisão de Tráfego Urbano”, XIII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, vol 2 , pp. 695-698.