



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS E ABORDAGENS DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

Arthur Besso

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Samuel Jurkiewicz, D. Sc.

Coorientador: Prof. Walter Porto Junior, Dr.-Ing.

Rio de Janeiro

Abril de 2013

ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS E ABORDAGENS DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

Arthur Besso

PROJETO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

Examinada por:

Prof. Samuel Jurkiewicz D. Sc.

Profa. Klitia Valeska Bicalho de Sá D. Sc.

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Abril de 2013

Besso, Arthur

Estudo Comparativo dos Métodos e Abordagens de Coordenação Semafórica – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VII, 21 p

Orientador: Samuel Jurkiewicz

Projeto Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Produção, 2013.

Referencias Bibliográficas: p.20.

Introdução 1. Conceituação do Problema 2. Métodos Matemáticos de Sincronização Semafórica. 3. Métodos Adaptativos. 4. Sincronização Bimodal. 5. Centralização ou Descentralização do Controle Semafórico. Conclusão.
I. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Produção. II. Estudo Comparativo dos Métodos e Abordagens de Sincronização Semafórica.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Estudo Comparativo dos Métodos e Abordagens de Coordenação Semafórica

Arthur Besso

Abril/2013

Orientadores: Samuel Jurkiewicz, D. Sc.

Walter Porto Junior, Dr.-Ing.

Curso: Engenharia de Produção

Este trabalho é um estudo comparativo entre as diferentes formas de análise e abordagem do problema da coordenação de semáforos. Inicialmente, são apresentados alguns modelos matemáticos de sincronização semafórica, com destaque para a maximização da banda verde. Em seguida, são vistas algumas formas de controle e coordenação semafórica denominadas adaptativas. A questão da centralização do controle semafórico também é discutida. Ao final do trabalho, tem-se uma noção geral do problema, de suas principais abordagens e das formas de solucioná-lo.

Palavras-chave: semáforo, coordenação, trânsito, controle, tráfego, sincronização.

Abstract of the Graduation Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Industrial Engineer.

Comparative Study on the Methods and Approaches of Signal Coordination

Arthur Besso

April/2013

Advisors: Samuel Jurkiewicz, D. Sc.

Walter Porto Junior, Dr.-Ing.

Course: Industrial Engineering

This work is a comparative study on the different forms of analysis and approaches over the problem of signal synchronization. Initially, a few mathematical models of signal synchronization are presented, with emphasis on the green band maximization. Then, some forms of signal control and coordination denominated adaptive are viewed. The signal control centralization issue is as well discussed. At the end of the work, one has a general awareness of the problem, of its main approaches and of the ways to solve it.

Keywords: signal, coordination, traffic, synchronization, control.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
Objetivos.....	1
Justificativa do Tema.....	1
Metodologia.....	1
1. CONCEITUAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.1. Tipos de Controle Semafórico.....	3
1.2. Gaps entre teoria e prática.....	5
2. MÉTODOS MATEMÁTICOS DE SINCRONIZAÇÃO SEMAFÓRICA.....	6
2.1. Minimização do Atraso.....	6
2.2. Maximização da Banda Verde.....	7
3. SINCRONIZAÇÃO BIMODAL.....	10
4. MÉTODOS ADAPTATIVOS.....	14
5. CENTRALIZAÇÃO OU DESCENTRALIZAÇÃO.....	17
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo de veículos por hora numa interseção de Gainesville (FL, EUA) entre 9h e 11h	4
Figura 2: Variáveis utilizadas no método de maximização da banda verde.....	7
Figura 3: Esboço de uma sincronização bimodal	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Objetivos de controle nos quatro níveis	14
Tabela 2: Comparação entre os sistemas de coordenação semafórica	16

INTRODUÇÃO

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar o problema do controle e coordenação de semáforos do ponto de vista de diversos autores.

De forma específica, visa-se comparar os métodos e as abordagens de se controlar e coordenar os semáforos de uma via arterial urbana, tratando das vantagens, desvantagens, aplicações e restrições de cada método e abordagem.

Justificativa do Tema

Visto que nos encontramos numa cidade que receberá, nos próximos anos, os eventos da Copa do Mundo e das Olimpíadas, a questão do transporte urbano está sendo um tema crítico nos ambientes político e social. Dadas as inúmeras dificuldades de se propor, planejar e implementar soluções eficazes no sentido de facilitar a mobilidade urbana, considera-se oportuna a introdução do tema do controle e da coordenação semafórica.

O principal objetivo das práticas de controle e coordenação semafórica é justamente aumentar a fluidez do trânsito, o que significa conferir maior capacidade de locomoção a pedestres, ciclistas, veículos públicos e privados ao longo das vias urbanas. Nesse sentido, esse conjunto de soluções pode proporcionar retornos mais imediatos e custos inferiores àqueles obtidos por soluções como a construção de novas vias expressas.

Um dos principais resultados esperados de uma coordenação semafórica eficiente é a redução dos congestionamentos, tidos como o grande problema do tráfego urbano nas metrópoles brasileiras.

Metodologia

O presente trabalho constitui uma pesquisa bibliográfica baseada principalmente em publicações científicas e acadêmicas. As pesquisas foram realizadas através da base Capes, principalmente no periódico Journal of Transportation Engineering.

1. CONCEITUAÇÃO DO PROBLEMA

O controle e a coordenação semafórica mostraram ser, na prática, uma das estratégias mais eficientes para controlar o tráfego de veículos em vias urbanas semaforizadas. Ao longo das últimas décadas, muitas pesquisas foram feitas no sentido de desenvolver modelos e algoritmos para otimizar a alocação de tempos nos sinais de trânsito. Cada modelo tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha depende muito das características do sistema. Mais recentemente, alguns *softwares* também foram desenvolvidos. No entanto, de acordo com TIANG (2011), eles ainda não estão prontos para serem implementados na prática.

O ato de controlar e coordenar semáforos envolve, no nível mais fundamental, a decisão de quando tornar cada sinal verde ou vermelho (a fase amarela será desprezada neste trabalho para efeito de simplificação). Conseqüentemente, derivam-se algumas variáveis:

- tempo de ciclo (intervalo entre dois sinais verdes ou dois vermelhos consecutivos);
- tempo de verde (intervalo durante o qual o sinal está verde);
- defasagem entre duas interseções consecutivas;
- condições da via e fluxo de veículos.

Pressupõe-se que os engenheiros de tráfego estudam as condições da via e o fluxo de veículos. Com isso, eles conseguem determinar o tempo de ciclo e o tempo de verde apropriados. Quando as condições da via e o fluxo de veículos se alteram, esses tempos precisam ser recalculados e os semáforos, reprogramados. É nisso que consistem as práticas de controle e coordenação semafórica.

O gerenciamento adequado do sistema semafórico confere mais fluidez ao tráfego. Os benefícios são os seguintes (LOPES, 2010 apud FHWA, 2005):

- Redução dos congestionamentos;
- Redução da emissão de poluentes e do consumo de combustível;
- Redução do número de acidentes e da severidade dos mesmos;
- Mitigação do comportamento agressivo dos motoristas;

- Postergação ou eliminação da necessidade de construção de vias para aumento da capacidade;
- Ordenamento dos fluxos de tráfego;
- Aumento da capacidade da interseção;
- Melhoria no movimento contínuo do fluxo com a coordenação dos semáforos adjacentes;
- Interrupção do fluxo pesado na via principal para permitir que os fluxos de pedestres e veículos na via secundária possam cruzar;
- Diminuição das demoras dos veículos na via secundária;
- Previsibilidade do tempo de espera de pedestres e ciclistas.

SHINAR, BOURLA e KAUFMAN (2004) também enfatizam o papel da sincronização semafórica em melhorar a segurança das vias urbanas. Eles mostram que o número de infrações de sinal vermelho é consideravelmente menor em vias com sinais sincronizados do que em vias com sinais dessincronizados. A diferença relativa é superior a 100%.

1.1. Tipos de Controle Semafórico

De acordo com CHANG (2007), existem cinco tipos de controles semafóricos:

- Operações pré-programadas: apropriado quando a demanda é previsível, os semáforos trabalham com ciclos e fases constantes;
- Operações de progressão: recomendado para vias arteriais, o foco é o atravessamento da via;
- Operações acionadas: a fase do semáforo pode mudar a partir da detecção de demanda pelos sensores próximos às interseções;
- Operações atuadas pelo tráfego: de acordo com as condições de trânsito nas vias, os semáforos têm seus tempos recalculados;

- Estratégias de controle adaptativas: é o que há de mais avançado e complexo atualmente. As condições de tráfego são captadas em tempo real, e depois são processadas para criar um plano ótimo para os tempos semafóricos.

YIN (2008) sustenta que, apesar dos sistemas controle adaptativo em tempo real serem mais fortes no estado da arte e no estado da técnica, eles não são usados com tanta frequência na prática, principalmente devido aos altos custos de implementação e manutenção. A prática mais usada são as operações pré-programadas com algumas variações dependendo do momento do dia e do dia da semana. No entanto, esse método ainda não é muito eficaz, pois a variabilidade do fluxo do tráfego vai além do horário e do dia.

Para ilustrar essa variabilidade, ele apresenta um gráfico com os fluxos através de um cruzamento na cidade de Gainesville (FL, EUA). Os dados foram captados ao longo de três meses durante o horário de pico (9h a 11h) em dias de semana.

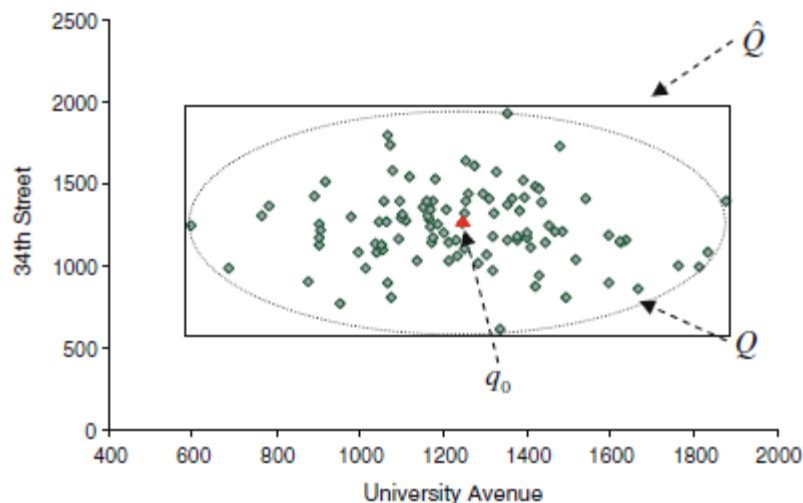


Figura 1: Fluxo de veículos por hora numa interseção de Gainesville (FL, EUA) entre 9h e 11h
 Fonte: YIN (2008)

Pela dispersão encontrada no gráfico, percebe-se a dificuldade em se programar a transição semafórica com antecedência, ou seja, com tempos pré-fixados. A questão está na escolha da quantidade de fluxo que será usada no modelo. Se o fluxo escolhido for muito alto, o modelo

não terá eficiência máxima para fluxos baixos e vice-versa. O problema está, então, na variabilidade do fluxo. Faz-se necessária, assim, a utilização de um método adaptativo, em que a programação semaforica possa variar em função do fluxo real em um determinado dia e horário.

1.2. Gaps entre teoria e prática

Segundo TIANG (2011), os modelos teóricos (pré-programados) de coordenação semaforica, sejam eles computacionais ou não, distanciam-se da prática nos seguintes aspectos:

- Variabilidade das velocidades dos veículos, que podem se originar das diferenças dos comportamentos dos motoristas, pedestres cruzando a via fora da faixa ou entrada e saída de veículos da via;
- Mudança antecipada da fase do semáforo, que pode ser causada pela baixa demanda;
- Defasagem do ponto de referência: seja ele qual for, deve ser o mesmo para todas as interseções semaforizadas (por exemplo, o início da fase verde);
- Transição semaforica, a qual ocorre quando o semáforo para de funcionar, algum veículo de emergência atravessa a interseção, os pedestres terminam de atravessar depois do tempo programado ou há uma mudança nos tempos dos semáforos;
- Relógios dos semáforos dessincronizados.

2. MÉTODOS MATEMÁTICOS DE SINCRONIZAÇÃO SEMAFÓRICA

Quando se fala em eficiência na sincronização semafórica, os indicadores de desempenho relacionados podem ser: tamanho da banda verde, tempo de parada total devido ao sinal vermelho e tamanho da fila ao final da fase vermelha. Como este último depende, em grande parte, do fluxo de veículos pela via, a precisão acaba sendo comprometida. Vamos então descrever os métodos derivados dos outros dois indicadores.

2.1. Minimização do Atraso

Uma das formas de se otimizar a sincronização semafórica em uma determinada via é minimizar o atraso, isto é, o tempo que um veículo perde devido às paradas nos sinais vermelhos. Esse tempo deve incluir tanto o próprio tempo de parada quanto os tempos de desaceleração e aceleração. Para efeitos de medição, poder-se-ia subtrair o tempo que um veículo levaria para percorrer a via sem parar nos semáforos do tempo total de percurso.

Um exemplo genérico da expressão matemática desse método foi proposto por YIN (2008) como um problema de programação linear:

$Min Max d(C,v,q)$ sendo d o atraso, C o ciclo semafórico, v o tempo de verde e q o fluxo de veículos

Sujeito a restrições lineares em v e C

O mesmo autor simplifica o modelo da seguinte forma:

$Min y$

Sujeito a $d(C,v,q) \leq y$ e outras restrições lineares em v e C

Nesse modelo, assim como em todos os modelos de sincronização semafórica, as variáveis de decisão são o tempo de verde e o ciclo, uma vez que o fluxo é estimado previamente. As outras restrições lineares podem ser a travessia de pedestres e ciclistas, por exemplo.

2.2. Maximização da Banda Verde

O primeiro método de maximização de banda verde foi proposto por MORGAN e LITTLE (1964) e é chamado *Half-Integer Synchronization*. Ele consiste em determinar as melhores posições dos centros dos vermelhos dos vários semáforos de duas fases ao longo de uma via, de modo a obter a maior largura de banda verde possível nos dois sentidos do tráfego e, se necessário, modificar tais valores para aumentar a banda no sentido de maior volume. (DUTRA e DEMARCHI, 2004)

O tamanho da banda verde significa o intervalo de tempo em que os veículos conseguem atravessar as interseções semaforizadas sem parar no sinal vermelho.

A figura abaixo ilustra uma via de mão dupla semaforizada, indicando as variáveis relevantes.

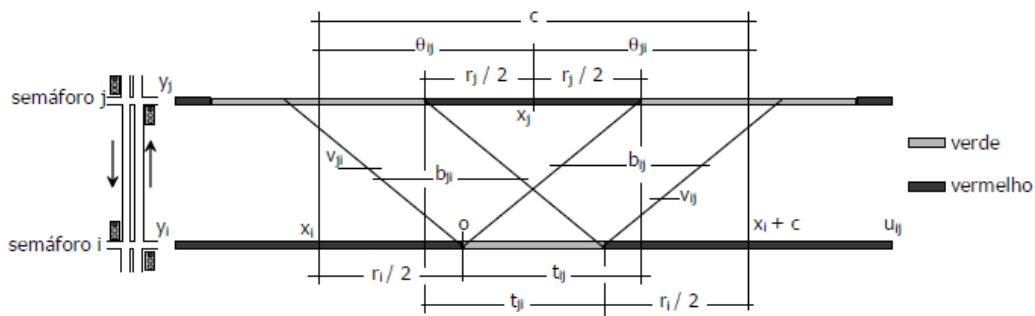


Figura 2: Variáveis utilizadas no método de maximização da banda verde

Fonte: DUTRA e DEMARCHI (2004)

Variáveis:

c : duração do ciclo [s];

r_i, r_j : duração dos vermelhos dos semáforos i e j para a via analisada [s];

x_i, x_j : instantes referentes aos centros dos vermelhos dos semáforos i e j [s];

y_i, y_j : posições dos centros das interseções semaforizadas i e j em relação à origem do diagrama espaço-tempo [m];

v_{ij}, v_{ji} : velocidades médias de percurso entre semáforos $i-j$ e $j-i$ [km/h];

b_{ij}, b_{ji} : largura das bandas verdes nos sentidos $i-j$ e $j-i$ [s]; e

t_{ij}, t_{ji} : tempos de viagem nos segmentos $i-j$ e $j-i$ [s].

Segundo DUTRA e DEMARCHI (2004), o método de MORGAN e LITTLE (1964) consiste, inicialmente, na definição da maior largura de banda possível para pares de semáforos. Para isso, os autores definem que em qualquer rede de semáforos existe pelo menos um semáforo crítico, identificado como sendo aquele em que a trajetória frontal da banda de um dos sentidos ($i-j$ ou $j-i$) toca um dos lados do vermelho do semáforo crítico, enquanto que a trajetória traseira da banda do sentido contrário toca o outro lado do vermelho. MORGAN e LITTLE (1964) consideram ainda que os semáforos críticos podem ser classificados em 2 grupos:

- Grupo 1: a trajetória frontal da banda no sentido $i-j$ toca o vermelho do semáforo crítico, enquanto que a trajetória traseira no sentido $j-i$ toca o outro lado do vermelho; e
- Grupo 2: a trajetória traseira da banda no sentido $i-j$ toca o vermelho do semáforo crítico, ao mesmo tempo em que a trajetória frontal no sentido $j-i$ toca o outro lado do vermelho.

Na Figura 1, o semáforo j enquadra-se no grupo 1, enquanto que o semáforo i pode ser classificado como pertencendo tanto ao grupo 1 como ao grupo 2.

A trajetória que toca o lado esquerdo do vermelho do semáforo j passa pelo semáforo i em $u_{ij} - r_j$, o que corresponde à largura a banda verde considerando o semáforo j . Neste caso, a maior banda seria obtida a partir de:

$$\max u_{ij}(\pi_{ij}) - r_j$$

Considerando diferentes pares de semáforos e $\pi_{ij} = \{0, 1\}$, a banda verde máxima e igual para ambas as direções é dada por

$$b = \max \min \max u_{ij} p_{ij} - r_j$$

Considere o seguinte exemplo sugerido por DUTRA e DEMARCHI (2004):

$$r_i = 40 \text{ s}, r_j = 30 \text{ s}, c = 60 \text{ s e } t_{ij} = t_{ji} = 10 \text{ s}$$

Fazendo as contas, a largura de banda máxima é de -5s, ou seja, há uma perda mínima de 5s ao se atravessar as duas interseções.

Não há um consenso entre os autores a respeito do método mais eficaz para a sincronização semafórica: minimização do atraso ou maximização da banda verde. No entanto, o último pode ser mais visível aos olhos do motorista e, talvez por isso, ele é o mais comum.

3. SINCRONIZAÇÃO BIMODAL

A grande maioria dos modelos de sincronização semafórica visa atender apenas aos veículos particulares. No entanto, uma das prioridades das políticas públicas dos sistemas de transportes deve ser o transporte coletivo. PORTO (2000) desenvolveu um modelo para a sincronização bimodal, o qual contempla tanto veículos particulares quanto coletivos. Esta seção tratará desse modelo.

Segundo ele, a inclusão dos veículos coletivos no modelo tem como vantagens, além daquelas observadas nos veículos particulares, a pontualidade e a frequência. O objetivo dessa inclusão é “proporcionar melhores condições para alterar a taxa de divisão modal em favor desse sistema com maior capacidade”.

A grande dificuldade da integração entre o tráfego de veículos coletivos e particulares na mesma sincronização se deve à diferença da dinâmica de deslocamento. Enquanto os veículos particulares trafegam com uma velocidade aproximadamente constante, os coletivos têm que realizar paradas para embarcar e desembarcar passageiros. Isso resulta numa velocidade média de 40km/h a 60km/h para automóveis e 18km/h a 28km/h para ônibus em vias arteriais. Implantando-se uma sincronização específica para veículos coletivos, a velocidade média dos automóveis particulares cairia aproximadamente pela metade. Assim, faz-se necessário um modelo mais flexível, que permita a adaptação aos dois grupos de veículos.

O modelo propõe a definição de duas ondas verdes (ou bandas verdes): uma Onda Verde Primária para veículos particulares e uma Onda Verde Secundária para veículos coletivos. Cada onda verde teria uma velocidade diferente.

São consideradas as seguintes medidas de regulamentação de tráfego, para a melhor adaptação dos veículos coletivos no modelo de sincronização semafórica:

- Cada momento do dia deve ter uma sincronização diferente, de acordo com o volume do tráfego;
- As faixas exclusivas para veículos coletivos são essenciais para a eliminação de conflito entre os mesmos e os particulares;
- É importante a troca de informações entre o motorista e a central de controle por um sistema de comunicação por rádio, de modo a garantir a eficiência no funcionamento do sistema;
- Alguns semáforos especiais regulariam a entrada e saída dos coletivos no trecho da sincronização, enquanto outros informariam a velocidade de deslocamento da onda verde;
- Deve-se evitar o ingresso de mais de um veículo coletivo por ciclo no trecho da sincronização.

O Modelo de Sincronização Bimodal foi implementado por meio de um *software* desenvolvido especificamente para isso. Este pode calcular três tipos de sincronização distintos: exclusiva para carros particulares, exclusiva para veículos coletivos e mista para ambos os fluxos.

Os dados de entrada do modelo são:

- Grau de prioridade: igual a 0 para prioridade total para o sentido do fluxo, igual a 0,5 para prioridades iguais para ambos os sentidos e igual a 1 para prioridade total para o sentido do contrafluxo;
- Número de interseções sinalizadas;
- Distâncias entre a primeira interseção e cada interseção subsequente dentro do sistema;
- Ciclo comum para os semáforos e seus tempos de verde e vermelho efetivos para o tráfego;
- Amplitude mínima admissível para as ondas verdes dos veículos particulares e coletivos;
- Velocidade de sincronização dos veículos particulares, no fluxo e no contrafluxo;
- Velocidade de deslocamento dos veículos coletivos, no fluxo e no contrafluxo;

- Tempo total gasto nos pontos de parada entre a primeira e cada interseção subsequente, no fluxo e no contrafluxo.

Os resultados de saída do programa são:

- Amplitude da onda verde;
- Momento de acionamento dos semáforos.

A localização dos pontos de parada dos veículos coletivos é outra parte fundamental no modelo. Se o veículo atinge a interseção durante a fase vermelha do sinal, o ideal é que o ponto esteja antes do cruzamento. No entanto, se ele atinge a interseção durante o sinal verde, o ponto deve estar depois do cruzamento.

A lógica da Sincronização Bimodal é a criação de duas ondas verdes com velocidades distintas. Entre cada par de interseções, a Onda Verde Secundária percorreria a distância demorando um ciclo a mais do que a Onda Verde Primária. Para isso, a distância entre as interseções deve ser constante e seu valor mínimo deve ser calculado de acordo com as velocidades médias dos veículos.

A figura a seguir ilustra um exemplo de sincronização bimodal, mostrando as ondas verdes primária e secundária.

ESBOÇO DE UMA SINCRONIZAÇÃO BIMODAL

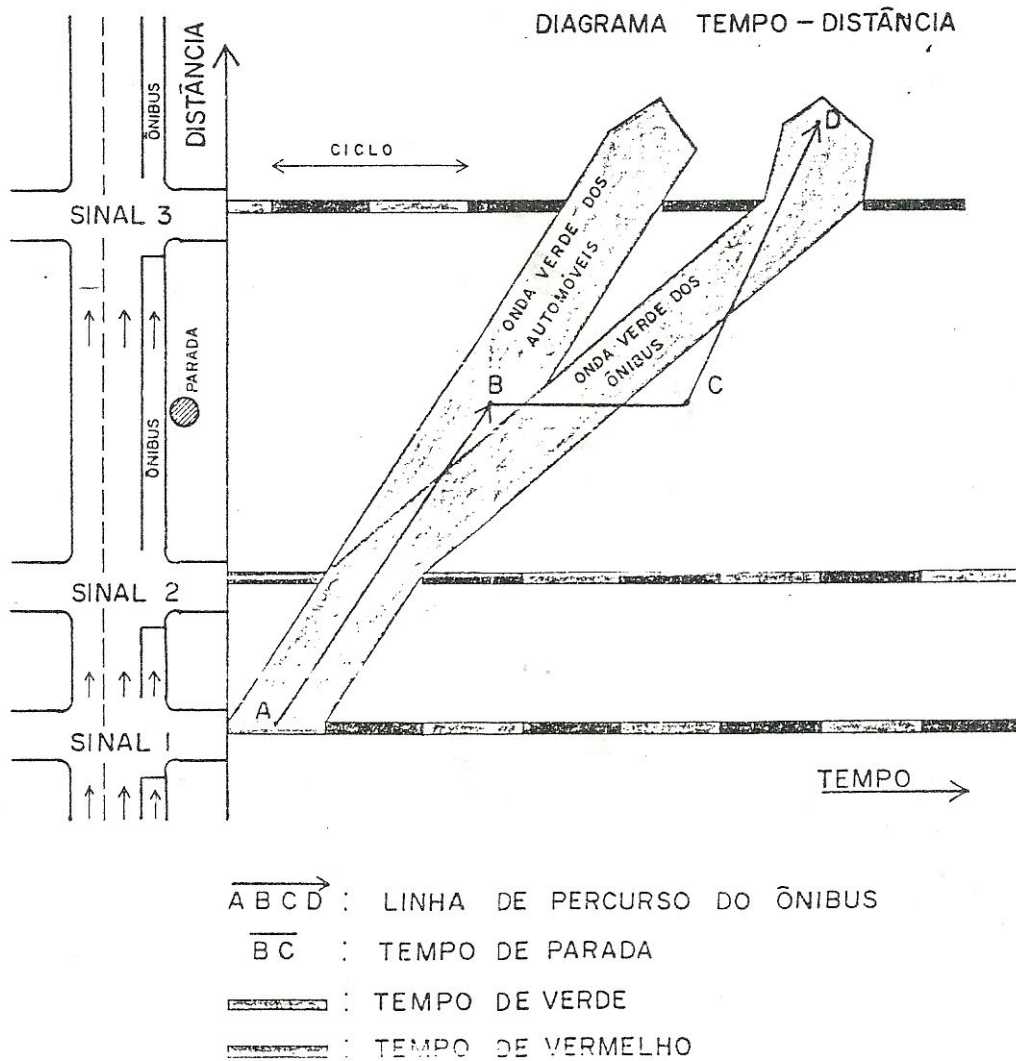


Figura 3: Esboço de uma sincronização bimodal

Fonte: PORTO (2000)

É importante observar que as ondas verdes atravessam o Sinal 3 em ciclos diferentes, possibilitando uma solução para modos de transporte com velocidades médias distintas.

4. MÉTODOS ADAPTATIVOS

Até agora, os métodos de coordenação semafórica apresentados partiram do pressuposto que as condições de tráfego na via em questão pode ser perfeitamente prevista a cada instante. Por isso, os modelos contemplam soluções constantes ao longo do tempo, à exceção, apenas, de variações durante horários de pico, fins de semana e feriados.

Os métodos chamados adaptativos passam a contemplar a variabilidade do fluxo do tráfego e das condições da via. Muitas vezes, tais elementos não se comportam com regularidade, o que pode ser provocado tanto por eventos extraordinários quanto pela própria natureza variável do trânsito, a qual é uma composição de diversos fatores de origens variadas.

Em qualquer sistema de controle de trânsito, é importante determinar os objetivos que se busca alcançar. WENCHEN, ZHAOCHENG e NINGNING (2009) estabelecem os objetivos de controle do tráfego de acordo com o nível do trânsito, conforme a tabela abaixo:

Tabela 1: Objetivos de controle nos quatro níveis

Nível do Trânsito	Características do Trânsito	Objetivos Gerenciais
Livre	Fluxo livre	Segurança e mínimo atraso
Leve	Chegada uniforme	Máximo conforto
Intenso	Aumento marcante	Máximos benefícios econômicos
Congestionado	Fluxo forçado	Máxima eficiência gerencial

Fonte: WENCHEN, ZHAOCHENG e NINGNING (2009)

Quando o trânsito está livre, os motoristas esperam atravessar os semáforos sem parar. Porém, a segurança também é importante. Com o tráfego leve, o objetivo se torna obter uma estratégia de controle com o menor tempo de parada. No nível intenso, deve-se assegurar que cada fase do semáforo tenha uma capacidade adequada para evitar longas filas. Com o trânsito congestionado, a capacidade deve ser o fator principal da função objetivo.

CHEN e LU (2010) listam alguns sistemas de coordenação semafórica adaptativa:

- ACS-LITE: utiliza controladores, detectores e sistema de comunicação para melhorar a operação de acordo com o horário do dia. Até 2009, não contava com o controle do ciclo, apenas com o controle da fase (verde-vermelho). Em um estudo de avaliação de desempenho, obteve 12% de redução no tempo de percurso, 28% de redução no número de paradas e 28% de redução no atraso;
- OPAC: possui três níveis de sincronização – o primeiro calcula os tempos dos ciclos, o segundo otimiza as defasagens em tempo real para cada interseção e o terceiro efetua a mudança ótima das sequências para o período projetado baseando-se em dados coletados pelos detectores. Os resultados de uma implementação desse sistema foram 26% de redução no tempo de percurso e 55% no tempo de parada;
- RHODES: trabalha com a previsão de demanda do tráfego de forma proativa, também em três níveis – nível de modelagem, nível do controle de fluxo e nível do controle da interseção. Redução de 8% e 18% nos tempos de viagem e parada, respectivamente;
- SCATS: trabalha com um computador central controlando computadores regionais, que por sua vez têm controladores de tráfego conectados. Os controladores possuem mais flexibilidade, podendo alterar os tempos determinados pelos computadores regionais. Pode atuar em vários modos: isolado, baseado no horário ou adaptativo. Redução de 14,5% e 40% nos tempos de viagem e parada, respectivamente;
- SCOOT: semelhante ao anterior, mas tem uma grande capacidade de armazenar e processar dados. Um estudo mostrou uma redução de 8%, 22% e 17% no tempo de viagem, tempo de parada e número de paradas, respectivamente.

A tabela a seguir ilustra o desempenho de cada um dos sistemas de acordo com simulações.

Tabela 2: Comparação entre os sistemas de coordenação semafórica

SYSTEM	BENEFITS (Percent change)			INITIAL CAPITAL COST (per intersection)*
	Travel Time	Delays	Stops	
ACS-Lite	-12 to +7	-38 to +2	-35 to -28	\$6,000 to \$10,000 ^a
OPAC	-26 to +10	-	-55 to 0	\$20,000 to \$50,000 ^b
RHODES	-7 to +4	-19 to -2	-	\$30,000 to \$50,000 ^c
SCATS	-20 to 0	-19 to +3	-24 to +5	\$25,000 to \$30,000 ^d
SCOOT	-29 to -5	-28 to -2	-32 to -17	\$30,000 to \$60,000 ^e

Fonte: CHEN e LU (2010)

O sistema ACS-LITE apresenta um custo de capital significativamente mais baixo que os demais, uma vez que os detectores não possuem a capacidade de fornecer dados diretamente para o sistema. Entre os outros, o SCOOT foi o único que obteve resultados positivos em todos os cenários simulados, mesmo nos casos mais desfavoráveis.

5. CENTRALIZAÇÃO OU DESCENTRALIZAÇÃO

O controle do tráfego de uma área urbana é um processo que engloba diversas funções, das quais uma é o controle semafórico. Quando se utilizam sistemas de controle responsivos, a complexidade das operações aumenta com a adição de elementos de tráfego. É nesse contexto que BAZZAN (2005) propõe a descentralização funcional e espacial do controle do tráfego.

Tal proposta se baseia em dois problemas: as restrições de tempo real e as restrições de interoperabilidade. As primeiras se referem ao fato de que as decisões devem ser tomadas com uma limitação de tempo; as últimas, ao fato de que os aparelhos de controle semafórico ainda não possuem tecnologia capaz de se integrar totalmente ao sistema.

O método desenvolvido por BAZZAN (2005) fundamenta-se na Teoria dos Jogos. A descentralização do controle do tráfego o dividiria em interseções, cada uma com um agente responsável. Os agentes teriam independência entre si, ou seja, a comunicação seria reduzida. O jogo se daria entre cada agente e o agente responsável pela interseção adjacente, podendo ser encarado como um jogo de dois jogadores. Assim, o problema consiste em encontrar um *payoff* ótimo. Isso significa canalizar as motivações individuais para atingir um resultado coletivo.

Para isso, o objetivo de cada agente deve estar de acordo com a sincronização em relação aos outros agentes. O *payoff* deve ser proporcional ao desempenho da interseção no sistema. Além disso, são introduzidas perturbações no sistema, podendo provocar a mudança de decisão do agente.

A matriz de *payoff* é calculada com base na eficiência da sincronização. O modelo é continuamente revisto e aprimorado por meio da incorporação dos resultados históricos ao cálculo dos *payoffs*. Os cenários mais recentes e com circunstâncias mais próximas ao atual ganham maior peso nesse cálculo.

Por outro lado, muitos sistemas possuem um controle centralizado, como visto na seção anterior. A diferença entre estes está no grau de autonomia que o sistema confere a cada controlador (ou agente de tráfego) nos níveis tático e operacional. O ideal é que essa autonomia seja proporcional à variabilidade da demanda do tráfego.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, foi possível entender o problema do controle e da coordenação semafórica. As soluções existentes podem se apresentar de uma forma mais analítica, como a abordagem clássica de MORGAN e LITTLE (1964), ou de uma forma mais robusta, como os sistemas computadorizados de sincronização adaptativa.

O modelo de sincronização bimodal permitiu observar que, na prática, a complexidade da coordenação semafórica pode aumentar quando percebemos os detalhes dos elementos que compõem o tráfego. Os veículos particulares e coletivos possuem naturezas distintas, incluindo a velocidade média e as paradas para embarque e desembarque de passageiros. Assim, foi necessário desenvolver um novo modelo.

A discussão sobre centralização mostrou-se relevante na medida em que os sistemas adaptativos tornam-se mais complexos e sofisticados. Porém, tendo em vista o atual estado da prática, é preciso dar preferência à implementação de tais sistemas de modo a se obter uma coordenação mais efetiva.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugiro uma continuidade na pesquisa de outras formas de abordagem do problema, como a lógica *Fuzzy*, como no trabalho desenvolvido por BALAJI e SRINIVASAN (2010). Também seria interessante uma análise mais profunda dos modelos, entrando nos detalhes das fórmulas, assim como simulações para melhor avaliar o resultado de cada método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALAJI, P. G., SRINIVASAN, D., *Type-2 Fuzzy Logic Based Urban Traffic Management*. Engineering Application of Artificial Intelligence 24, p. 12-24, 2010.
- BAZZAN, A. L. C., *A Distributed Approach for Coordination of Traffic Signal Agents*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- CHANG, E. C., *Improving China Traffic Signal Operations through Signal System Retiming*. ISSTP, 2007.
- CHEN, H., LU, J. J., *Comparison of Current Practical Adaptive Traffic Control Systems*. ICCTP, 2010.
- DUTRA, C. B., DEMARCHI, S. H., *Coordenação Semafórica Através do Método de Maximização da Banda Verde*. Anais do XVIII Congresso da ANPET, ANPET, Florianópolis, p. 503-514, 2004.
- FHWA, 2005. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/pubstats.htm>>. Acesso em: 29/05/2009.
- LOPES, L. C. F., *Método de Otimização das Defasagens de Corredores Arteriais Rio de Janeiro*. UFRJ/COPPE, 2010.
- MORGAN, J. T., LITTLE, J. D. C., *Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth*. Operations Research, v. 12, n.6, p.896-912, 1964.
- PORTO JUNIOR, W., *Transporte Coletivo na Onda Verde*. Notas de Aula, Programa de Engenharia de Transporte, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- SHINAR, D., BOURLA, M., KAUFMAN, L., *Synchronization of Traffic Signal as a Means of Reducing Red-Light Running*. Ben Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel, 2004.

TIANG, Z. Z., *Signal Timing and Coordination – Bridging Theories and Practices*. ICCTP, 2011.

WENCHEN, Y., ZHAOCHENG, H., NINGNING, C., *Adaptive Control Method of Multi-phase Intersection Based on Traffic Status Identification*. ICCTP, 2009.

YIN, Y., *Robust Optimal Traffic Signal Timing*. Transportation Research, Part B 42, p. 911-924, 2008.