

WAGNER FONTES GODOY

**Aplicação da ferramenta TRANSYT na otimização
e implantação de corredores exclusivos para ônibus
na cidade de Londrina**

LONDRINA

2010

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

**Aplicação da ferramenta TRANSYT na otimização
e implantação de corredores exclusivos para ônibus
na cidade de Londrina**

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

WAGNER FONTES GODOY

Londrina, Agosto de 2010.

Aplicação da ferramenta TRANSYT na otimização e implantação de corredores exclusivos para ônibus na cidade de Londrina

Wagner Fontes Godoy

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

Profa. Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes
Orientador

Prof. Dr. Taufik Abrão
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Dr. Paulo Cesar Marques da Silva

Dr. José Alexandre de França

Dr. Leonimer Flávio de Melo

À minha família, dedico este momento tão importante em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

À minha esposa, Vanessa e ao meu filho João Gabriel pelo amor, apoio, compreensão e incentivo incondicional durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Roberto e Ana, que nunca mediram esforços ao longo da minha vida, sempre dando exemplos de coragem, amor e orações dedicadas a mim.

À minhas irmãs Edilene e Edvania pelo amor, força e incentivo.

Ao meu sogro Antonio e minha sogra Maria Telma pela acolhida e também pelas palavras de apoio e incentivo.

À minha orientadora, Silvia, pelos ensinamentos, disponibilidade, compreensão e apoio.

À minha amiga Karina, pela sua especial atenção e companheirismo diminuindo a carga de preocupações durante o trabalho.

Aos meus amigos Marco Antonio e Rodrigo, com os quais tive o privilégio de compartilhar momentos memoráveis durante a realização do curso.

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

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

Aplicação da ferramenta TRANSYT na otimização e implantação de corredores exclusivos para ônibus na cidade de Londrina

Wagner Fontes Godoy

AGOSTO/2010

Orientador: Profa. Dra. Silvia Galvão de Souza Cervantes

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

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

Este trabalho apresenta uma aplicação da ferramenta TRANSYT/10, na avaliação do desempenho operacional do controle semafórico em três dos principais corredores arteriais da malha viária central da cidade de Londrina. A motivação deste estudo é a recorrência de congestionamento em alguns corredores desta malha viária. Também o período de transição na criação de corredores exclusivos para ônibus. Esta alteração implica no aumento da capacidade das vias, com a retirada das faixas de estacionamento. O software TRANSYT/10 é uma ferramenta amplamente utilizada em diversos países no gerenciamento de tráfego urbano. No contexto de planejamento e gerenciamento desta malha, o controle otimizado dos semáforos, ainda inexistente, possibilita a minimização do atraso e número de paradas. A avaliação de diferentes cenários, com e sem faixas exclusivas, diferentes tamanhos de ciclo e otimização do tempo de verde e defasagem confirmam que é possível melhorar as condições de tráfego para ambos os usuários de transporte coletivo e automóveis.

Resumo

This paper presents an application of TRANSYT/10 program in order to assess the operational performance of traffic control in three of the main arterial corridors of the central area of Londrina city. The motivation of this study is the recurrence of congestion in some corridors of this region. This change also means increasing the capacity of the road by removing parking lanes by creating exclusive bus lanes. The TRANSYT/10 software is a tool widely used in various countries in managing urban traffic control. In the context of planning and management of this network, the optimization of traffic control, which currently nonexistent, enables the minimization of both delay and number of stops. Evaluation of different scenarios, with and without exclusive bus lanes, different cycle time, offset and green signal optimization confirms that it is possible to improve traffic conditions for both cars and public transport.

Conteúdo

Lista de Figuras	ix
Lista de Símbolos e Abreviações	1
1 Introdução	1
1.1 Justificativas	2
1.2 A cidade de Londrina	3
1.2.1 Contexto de implantação	4
1.3 Sistemas de transporte urbano	6
1.3.1 Exemplos de Eficiência no Transporte Coletivo	8
2 Conceitos Básicos	10
2.1 Redes Viárias	10
2.2 Fluxos Veiculares	11
2.3 Elementos de Controle de Tráfego	12
2.4 Otimização	14
2.4.1 Algoritmo Hill Climbing	14
2.5 Modelo de Tráfego	15
2.5.1 Estratégia de Controle em Tempo Fixo	16
2.5.2 Estratégia de Controle Atuado	16
2.6 Ferramenta de cálculo TRANSYT	18
2.6.1 Atrasos	23
Referências	25

3	Objetivos	29
3.1	Geral	29
3.2	Específicos	29
	Artigo para Publicação	30
4	Aplicação da ferramenta TRANSYT/10 na otimização semafórica em corredores viários na cidade de Londrina	31
4.1	Introdução	31
4.2	Ferramenta de controle	32
4.2.1	Caracterização das Vias em Estudo	34
4.3	Metodologia	39
4.3.1	Dados Utilizados	39
4.4	Resultados	40
4.5	Diretrizes para um planejamento viário	45
4.6	Conclusões	46
4.7	Agradecimentos	46
	Referências	47
5	Conclusão	49
5.1	Recomendações e propostas para trabalhos futuros	49

Lista de Figuras

2.1	Interseção Isolada	11
2.2	Diagrama de Tempos	13
2.3	Diagrama de Blocos do Processo de formulação e validação de um modelo matemático	15
2.4	Modelo do TRANSYT	19
2.5	Perfil IN-profile	19
2.6	Perfil OUT-Profile	20
2.7	Perfil GO-Profile	20
2.8	Modelagem do comportamento do tráfego no TRANSYT	24
4.1	Rua Benjamin Constant	35
4.2	Rua Professor João Cândido	35
4.3	Av. Duque de Caxias	36
4.4	Representação da situação atual das faixas de tráfego nas vias em estudo	36
4.5	Malha Central da Cidade de Londrina, Fonte: Google Maps, 2010	38
4.6	Representação da rede no TRANSYT/10	38
4.7	Índice de Desempenho - Atraso Total (pcu-h/h)	42
4.8	Diagrama Espaço x Tempo - Cenário Original.	42
4.9	Diagrama Espaço x Tempo - Otimização do cenário original.	43
4.10	Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 3 - Ampliação e otimização das faixas de tráfego - tempo de ciclo 45 segundos.	43
4.11	Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 3 - Resultados da otimização na faixa de ônibus.	44
4.12	Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 4 - Ciclo 60 s, com duas faixas de rolagem.	44
4.13	Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 5 - Ciclo de 60 s, com três faixas de rolagem.	45

Introdução

As redes de infra-estruturas de transportes são um meio essencial através das quais as funções das cidades (centros de atividades econômicas e de serviços) podem ser realizadas. Estas servem ao mesmo tempo de ligação entre as cidades e os seus subúrbios, regiões envolventes e outras áreas urbanas. No entanto, a necessidade crescente de mobilidade nas sociedades modernas criou uma situação de sobrecarga em muitos sistemas de transportes, onde a infra-estrutura existente é incapaz de atender as mais diversas necessidades vigentes (1).

Inserida neste contexto, a otimização do controle de tráfego através de um sistema de semáforos coordenados é uma das formas mais econômicas utilizadas para minimizar problemas de trânsito em curto prazo. Também na redução de custos de operação com conseqüente redução dos tempos de viagem, redução dos impactos ambientais, uso racional de combustível e principalmente melhora na qualidade de vida dos seus usuários.

A discussão sobre a forma de otimizar o controle do tráfego urbano é uma constante na maioria das cidades do mundo moderno, independentemente de padrões culturais e econômicos. Sua gestão demanda soluções adaptadas à cada realidade que são particulares e dinâmicas (2).

Nos grandes centros urbanos, as condições do tráfego tendem à rápida saturação das vias e longos períodos de congestionamento. Tal efeito ocorre tanto em países desenvolvidos, com expressiva frota de veículos, como naqueles com menor frota, pois nesses a rede viária também é menor (3).

Existem disponíveis várias ferramentas desenvolvidas para o gerenciamento de uma malha viária urbana. Desde simples controles locais temporizados até centrais de controle de tráfego que buscam otimizar o fluxo entre as interseções em tempo real e de forma coordenada.

As ferramentas de cálculo para controle dos tempos semaforicos são basicamente: de tempos fixos ou de controle atuado. As estratégias de tempos fixos distribui os tempos

semafóricos de acordo com um plano pré-determinado. Estes planos são elaborados a partir de contagens veiculares manuais, para levantamento estatístico das condições de fluxo, sendo elaborados planos específicos para diferentes horários do dia, dias da semana e/ou meses (4).

As ferramentas de cálculo para controle atuado utilizam-se de técnicas de detecção para monitorar o comportamento do tráfego. Baseados nas informações coletadas são realizados os cálculos de otimização e implementação de variáveis de controle para o ajuste dos tempos semafóricos. O controle atuado pode ser sub-dividido em tempo fixo com seleção dinâmica de planos, de acordo com a demanda verificada (5), gap crítico (6) e adaptativo (7), (8), (9) que serão melhor discutidos no capítulo de conceitos básicos.

Limitações tecnológicas, econômicas e financeiras, características dos países em desenvolvimento, além de outros fatores condicionantes políticos e sociais são fatores determinantes na forma de gerenciar a malha viária. Também estes fatores têm determinado que os sistemas de transporte público coletivo sob pneus se consolidem como modo de transporte mais importante nas cidades latino-americanas. Com a sua facilidade para trafegar por diferentes tipos e qualidades de vias, os ônibus aproveitam a infraestrutura viária que compartilham com os automóveis (10).

Assim, este trabalho visa avaliar a problemática de priorização do transporte coletivo na malha viária central da cidade de Londrina. Considerando as condições de infraestrutura existente e a implantação de uma nova política de gerenciamento de tráfego, optou-se por simular vários cenários de tráfego com e sem otimização semafórica. Para tanto, considerando as características intrínsecas dos cenários em questão, optou-se pela utilização do *software* TRANSYT/10 (licença acadêmica), que é uma das mais consagradas ferramentas de cálculo utilizada internacionalmente para determinação dos planos semafóricos em tempo fixo.

Também, pretende dar subsídios para a discussão quanto à implantação de corredores exclusivos para transporte público coletivo. Para tal objetivo, são apresentados resultados para o auxílio na busca de uma gestão sustentável para a melhor utilização das vias públicas servindo o maior número de usuários possível de forma a proporcionar transporte eficiente e de qualidade. A priorização do transporte coletivo público visa garantir acessibilidade da população a todo espaço urbano. Neste sentido, entende-se o transporte coletivo como importante instrumento de combate a pobreza e de promoção da inclusão social (11).

Deseja-se também, possibilitar a discussão sobre quais são os objetivos dos gestores de transportes: a priorização de veículos ou de pessoas, visto que o transporte público coletivo movimenta um número muito maior de usuários do que o transporte particular.

1.1 Justificativas

Devido à recorrência de congestionamentos em alguns dos principais corredores arteriais da malha central, a administração pública optou por implantar a priorização do transporte

coletivo através da criação de corredores exclusivos para ônibus. Este processo iniciou-se no mês de março de 2010, e vem ocorrendo em etapas. O principal objetivo é a melhora na qualidade de vida dos seus usuários e seu conseqüente impacto na produtividade e competitividade econômica do município.

Poucas cidades brasileiras possuem infra-estrutura para a implantação e gerenciamento de centrais de controle de tráfego urbano em tempo real. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de baixo custo para minimização do atraso, utilizando a infraestrutura semafórica existente, composta em sua grande maioria de controladores semafóricos eletromecânicos.

Através da avaliação dos diversos cenários, considerando diferentes tempos de ciclo, aumento da capacidade das vias, otimização dos tempos de verde, defasagem e implantação de corredores exclusivos de ônibus e taxis com passageiros através da remoção da faixa de estacionamento, pretende-se contribuir de forma simples e objetiva para um melhor desempenho operacional beneficiando ambos os usuários de transporte coletivos e automóveis.

Espera-se assim melhorar o desempenho desta sub-rede através da redução do número de paradas e da minimização do atraso através da otimização dos tempos de verde e defasagem calculados pelo TRANSYT/10.

1.2 A cidade de Londrina

Na cidade de Londrina, objeto de estudo desta pesquisa, o ônibus é o único meio de transporte público disponível. Para este meio de transporte não existe qualquer tratamento preferencial, operando no tráfego misto disputando espaço com os demais veículos em vias cada vez mais congestionadas. As vias possuem como característica principal a recorrência de congestionamentos, que impactam diretamente na qualidade de vida dos seus usuários (poluição sonora, longos tempos de viagem, stress), aumento da poluição atmosférica e conseqüente redução dos recursos ambientais.

Na cidade, existem em torno de 190 semáforos instalados, dos quais 100 são eletromecânicos e os demais eletrônicos. Atualmente, 38 cruzamentos com semáforos são monitorados pela Companhia Municipal de Transporte Urbano - Londrina (CMTU), (12).

Durante os últimos 5 anos, a cidade tem registrado um significativo aumento no número de automóveis. De acordo com o Detran-PR, em Abril de 2010 a frota de veículos registrados na cidade é 268.811, e estima-se que diariamente circulem pelas ruas por volta de 75 mil veículos (13). A frota de ônibus coletivos em operação é composta por 387 veículos (14).

No período de obtenção dos dados para realização deste trabalho, todas as vias da malha central de Londrina eram de duas faixas para rolagem e a terceira para estacionamento. Os semáforos, em torno de 70, nesta subrede, eram em sua grande maioria eletromecânicos. Os

tempos semafóricos foram ajustados empiricamente sem qualquer cálculo de otimização, seja de tempo de verde ou defasagem. E geometricamente as vias não são suficientemente longas para acomodar as filas de veículos sem que estas interfiram nas vias à montante.

Destacam-se como trechos mais problemáticos a Rua Sergipe, Avenida Benjamin Constant, Rua Professor João Candido, Avenida Arcebispo Dom Geraldo Fernandes e Avenida Duque de Caxias. No entanto, todo o quadrilátero central é uma região de grande concentração de estabelecimentos comerciais, predominantemente populares. Esta característica reafirma a importância de garantir acessibilidade através de um sistema de transportes coletivos eficiente.

Assim, neste trabalho busca-se definir os tempos semafóricos otimizados para uma situação de operação com duas faixas de rolagem para tráfego misto e outra situação onde ocorre a criação de uma faixa exclusiva para ônibus e duas faixas para o tráfego de automóveis particulares. Com isto, busca-se uma maior eficiência do sistema de transporte da malha viária central da cidade de Londrina.

1.2.1 Contexto de implantação

O desenvolvimento deste trabalho ocorre em um momento histórico do gerenciamento de tráfego da cidade de Londrina. Devido aos congestionamentos recorrentes em alguns dos principais corredores arteriais da malha central, e seu conseqüente impacto de cunho econômico, social e ambiental, em março de 2010, a administração pública decidiu pela implantação de corredores exclusivos para ônibus e taxis com passageiros, através da remoção da faixa de estacionamento de algumas vias.

A simulação é uma ferramenta adequada para o estudo de problemas onde os métodos convencionais de análise não permitem a percepção de todos os detalhes e implicações da situação em foco (15). Desta forma, este estudo visa avaliar os impactos diretos desta proposta através da comparação dos resultados produzidos pela estratégia TRANSYT/10 para os diversos cenários de avaliação disponíveis.

Uma das principais vantagens da simulação é permitir uma criteriosa avaliação de um conjunto de propostas para resolução de problemas antes da sua efetiva implementação, reduzindo custos e principalmente evitando conseqüências muitas vezes mais difíceis que o problema original (15).

Em março de 2010, a administração pública de Londrina decidiu pela implantação de faixas exclusivas para ônibus e taxis com passageiros removendo as faixas de estacionamentos das Av. Benjamin Constant, Av. Duque de Caxias e Rua Professor João Cândido.

Dentre os principais objetivos esperados com alteração destacam-se a melhoria nas condições de tráfego dos coletivos, redução do tempo de viagem e conseqüentemente atração

de novos usuários. Como benefício adicional, espera-se diminuir o congestionamento nestas vias reduzindo assim a poluição ambiental e o custo do serviço.

Nos trechos onde serão implantados os corredores de ônibus e taxis com passageiros não será mais permitido estacionamento. Durante a semana, a faixa exclusiva de ônibus possui exclusividade para tráfego de coletivos e possui horário de funcionamento das 07:00 horas até as 19:00 horas. Nos sábados, a faixa funciona das 07:00 horas até as 14:00 horas. Aos domingos, todas as vias são livres para o tráfego de qualquer veículo.

Devido à grande concentração de estabelecimentos comerciais nestes corredores, a dificuldade para obtenção de uma vaga para estacionamento era grande, fazendo com que os motoristas circulassem em baixa velocidade à procura da mesma, impactando diretamente no fluxo veicular destas vias.

De acordo com o CMTU, o único impacto negativo desta medida é o suprimento de aproximadamente 350 vagas de estacionamento (16). No entanto, observa-se que em alguns trechos existem problemas de sinalização e principalmente conscientização dos motoristas que trafegam pelo corredor. Caso haja a necessidade de manobra para conversão à direita na Rua Professor João Cândido, os motoristas devem sinalizar a entrada na faixa exclusiva aproximadamente 20 metros antes da conversão.

Preliminarmente, a CMTU esperava reduzir os tempos de viagens em aproximadamente 7 minutos nos horários de pico e 10 minutos nos demais horários. A implantação destas faixas teve um custo estimado de R\$ 150 mil (16).

No corredor da Rua Professor João Cândido, a faixa entrou em operação no dia 12 de abril de 2010, e de acordo com as informações recebidas do CMTU, foi possível em uma linha reduzir o tempo de viagem em 11 minutos, através da simples alteração do itinerário e utilização da faixa exclusiva (16). A terceira faixa deve entrar em operação na Av. Duque de Caxias a partir da segunda quinzena de Julho-2010. Em relação a Av. Benjamin Constant ainda não existe previsão.

Como estes corredores são caracterizados predominantemente pela existência de pequenos estabelecimentos comerciais, estima-se que pelo menos 300 comerciantes serão afetados pela remoção da faixa de estacionamento, fato este que causou grande descontentamento entre os comerciantes, que reclamam da redução do número de clientes devido à ausência de vagas para estacionamento (16).

Os mesmos consideram que uma alteração desta natureza, que apresenta impacto direto em suas atividades, deveria ter sido amplamente discutida e avaliada antes de sua efetiva implantação.

Conforme informações do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina (IPPUL), 12,5 mil veículos particulares e 375 ônibus circulam em cada um dos dois corredores, em média, por dia. Considerando-se apenas o total de ônibus, que passam em cada

via, diariamente, são transportados em média 18.750 passageiros (16). Ou seja, através da criação destes corredores espera-se priorizar o transporte coletivo em relação ao transporte individual.

1.3 Sistemas de transporte urbano

As grandes cidades dos países em desenvolvimento, apresentam graves problemas de qualidade de vida, entre os quais destacam-se os de transporte, podendo-se destacar a queda da mobilidade e da acessibilidade, degradação das condições ambientais, altos níveis de congestionamentos e acidentes de trânsito.

As cidades, nas últimas décadas, foram construídas visando possibilitar o uso eficiente do automóvel, através da ampliação do sistema viário e da utilização de técnicas que garantam boas condições de fluidez, ao passo que os sistemas de transportes públicos se tornam cada vez mais carentes de condições que satisfaçam as necessidades mínimas de mobilidade e eficiência (17).

Ainda em seu trabalho (17) comenta que além da parcela da população que a cada ano vê diminuída sua acessibilidade, encontra problemas na estrutura viária também o usuário do transporte individual. É cada vez maior, o número de conflitos e alto o índice de acidentes. Menor o nível de serviço, com constantes congestionamentos, o que vem elevando o tempo médio das viagens.

Segundo (18), aumentar a capacidade das vias congestionadas traz um resultado adverso ao pretendido, atraindo mais demanda. Assim, pode-se atingir o objetivo pretendido com a restrição de tráfego aliada a um conjunto de soluções complementares que proporcionem maior eficiência a um custo inferior. Tais ações procuram otimizar o uso das vias disponíveis através da melhor racionalização da circulação, implantação de dispositivos integrados de controle de tráfego, melhora na infra-estrutura do sistema de transporte público, restrição de veículos particulares na área central das cidades, redução da oferta de estacionamentos por longos períodos de tempos nestas áreas, buscando a redução dos atrasos nas viagens que possuem impacto direto no consumo de combustível, desgaste mecânico, poluição e piora na qualidade de vida dos seus usuários.

A eficiência do sistema de transporte urbano pode ser melhorada se estratégias de gerenciamento que priorizarem o transporte coletivo em relação ao individual forem implantadas (19). Uma destas estratégias que vêm ganhando destaque é priorização semaforica para tal transporte. Estas estratégias já foram testadas em várias cidades nos Estados Unidos e já vêm sendo usadas no Canadá, Japão e Europa. Em geral, as estratégias de priorização são classificadas em dois níveis (20): prioridade passiva e prioridade ativa. A prioridade passiva consiste em ajustar a programação semaforica manualmente ou através de programas computacionais como o TRANSYT, dando maior peso a aproximações com maior volume

de passageiros. Esta técnica é mais adequada para corredores com volume considerável de ônibus, nos quais os tempos de embarque/desembarque não variam muito (21). Já a prioridade ativa envolve a detecção da presença dos coletivos nas proximidades das interseções, e depende da lógica do sistema e das condições do tráfego.

De acordo com (11), os altos custos de transporte provocados pelos severos congestionamentos de tráfego limitam as escolhas de localização das empresas e elevam os custos de produção, o que afeta o emprego e a renda. Os impactos diretos, por sua vez, envolvem o acesso aos serviços e às atividades sociais básicas e às oportunidades de trabalho dos mais pobres. A inexistência ou a precariedade na oferta dos serviços e as altas tarifas do transporte público, por exemplo, restringem as oportunidades de trabalho dos mais pobres (na procura de emprego ou no deslocamento ao local de trabalho), condicionam as escolhas do local de moradia, e dificultam o acesso aos serviços de saúde, educação e lazer.

Os custos de transporte limitam ainda o acesso às oportunidades de trabalho, pois procurar emprego inclui despesas com tarifas de transporte público, chegando a ser proibitivo para determinadas parcelas da população. Nesse sentido, a classe menos favorecida das periferias leva desvantagem em relação aos moradores das áreas centrais. Tendo em vista que no mundo da informalidade as relações de trabalho são inconstantes e se dão numa base diária, morar longe do trabalho, e/ou oportunidade de trabalho significa alto gasto e menos renda disponível para atender outras necessidades básicas.

Em seu trabalho (22), avaliou o desempenho operacional da prioridade semafórica do tipo passiva no controle em tempo real e em tempo fixo de um dos principais corredores arteriais de Fortaleza. Na avaliação dos cenários, foram consideradas as seguintes medidas de desempenho: atraso veicular e número de paradas estimadas pelo sistema SCOOT, assim como tempo de percurso para ônibus e automóveis coletados em campo durante a operação de cada cenário. Os resultados não foram favoráveis à adoção da prioridade passiva no corredor de estudo, levando à conclusão de que o controle em tempo real do SCOOT, programado para uma boa progressão semafórica do tráfego geral (ônibus e automóveis), é o mais indicado para um corredor arterial com características semelhantes ao analisado.

De acordo com (2), as diversas estratégias de controle de tráfego comercialmente disponíveis foram desenvolvidas, testadas e algumas até mesmo aplicadas em seus países de origem. Uma grande limitação na utilização destas estratégias, como pacotes comerciais a serem adquiridos e aplicados em sistemas de tráfego urbano brasileiro são as especificidades relativas aos sistemas de tráfego de seus países de origem. Além disso, o custo destas estratégias é elevado na aquisição, implantação e manutenção.

Observa-se que as cidades se desenvolvem de forma à possibilitar o uso eficiente do automóvel, através da ampliação do sistema viário e da utilização de técnicas que garantam boas condições de fluidez. Ao passo que os sistemas de transportes públicos coletivos demonstram incapacidade de oferecer infra-estrutura suficiente para atender uma crescente demanda da população que a cada ano encontra diminuída sua acessibilidade.

A incapacidade de oferecer infra-estrutura suficiente para atender ao crescente contingente de veículos circulando, deixa claro que a priorização do transporte coletivo não é mais apenas uma tendência, mas sim uma necessidade.

1.3.1 Exemplos de Eficiência no Transporte Coletivo

Na cidade de Bogotá, Colômbia, encontra-se em operação o sistema TransMilenio, inaugurado com sucesso em Dezembro/2000, estabeleceu um novo paradigma para o transporte público coletivo, embora em sua primeira etapa foram implantados apenas 40 km de corredores exclusivos para ônibus articulados de maior capacidade, e participação de apenas 10% do total das viagens diárias, a população imediatamente percebeu os benefícios desta alternativa frente ao transporte público convencional. Do mesmo modo, ao longo destes corredores se reduziram as taxas de acidentes, diminuíram os níveis de poluição e se incrementou a velocidade média dos automóveis (10), (23).

A cidade experimentou uma positiva transformação urbana e uma melhoria da mobilidade ao longo das novas linhas de transporte, tornando o modelo uma alternativa conveniente e financeiramente viável em relação ao metrô, impulsionando assim a implantação deste modelo em outras cidades colombianas, igualmente a sua expansão na capital colombiana.

Ainda de acordo com (10), nos corredores onde permanece o atendimento convencional, operado por empresas tradicionais, a qualidade do serviço continua péssima, gerando os mesmos transtornos já conhecidos a mais de oito décadas após a aparição dos primeiros ônibus de Bogotá, uma vez que estas empresas demonstram uma organização complexa e resistente às medidas que visam alterar a situação do transporte naquela cidade.

No Paraná, temos o exemplo da cidade de Curitiba que é conhecida internacionalmente por um eficiente e inovador sistema de transporte coletivo. Já no início da década de 80, os ônibus articulados com capacidade 80% superior começaram a substituir gradativamente os antigos expressos. Isto significou economia de combustível em 46% e redução de custo de 21% por passageiro transportado (24).

A partir da década de 90, foi posto em funcionamento o primeiro ônibus biarticulado brasileiro, batizado de “Metrobus”, com 25 metros de comprimento e capacidade para transportar até 270 passageiros. Neste período foi implantada uma das maiores novidades do transporte coletivo naquela década, sendo criadas as Linhas Diretas onde rampas de acesso permitiram o embarque e desembarque de passageiros através das estações-tubo, que serviam como pequenos terminais, possibilitando ao usuário a troca de linhas sem pagar nova passagem.

A característica principal do sistema de transportes implementado em Curitiba é a busca pela implantação de melhorias contínuas sem a necessidade de investimentos incompatíveis com a realidade da cidade.

Dentre as principais características do transporte público coletivo na cidade de Curitiba destacam-se:

- Integração com o uso do solo e sistema viário, configurando uma cidade com crescimento linear;
- Ampla acessibilidade com o pagamento de uma única tarifa;
- Prioridade do transporte coletivo sobre o individual;
- 72 km de canaletas, vias ou faixas exclusivas, caracterizando corredores de transporte. Terminais fora dos eixos principais ampliam a integração.

Observa-se que a busca pelo aumento a eficiência dos sistemas de transporte público é uma tendência amplamente avaliada e discutida em todo mundo. Porém no Brasil, o desenvolvimento de alternativas que implementem melhora na qualidade deste serviço esbarra não somente em limitações técnicas mas principalmente no alto custo de implantação e adequação da infra-estrutura vigente.

Conceitos Básicos

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

2.1 Redes Viárias

Para efeito deste trabalho, as redes viárias são compostas pelos seguintes elementos, conforme visualizados na Figura 2.1 (25):

1. **faixa de trânsito** - é o espaço determinado para o fluxo de veículos em um sentido único de fluxo (em fila simples);
2. **pista** - é um conjunto de faixas de trânsito;
3. **via** - é um conjunto de pistas que pode permitir sentido duplo de fluxo;
4. **via externa** - é a via que recebe fluxo veicular externo da região em análise;
5. **via interna** - é a via que recebe fluxo veicular já circulante na região em análise. Existem duas seções notáveis: uma seção a montante, de entrada da via, e outra a jusante, coincidente com a faixa de retenção;
6. **interseção** - é o local onde duas ou mais vias se cruzam, criando um conflito entre os sentidos de circulação de veículos;
7. **semáforo** - é um dispositivo de controle de tráfego que alterna o direito de passagem de veículos e pedestres em interseções mediante a utilização de indicadores luminosos. Este sistema de controle organiza de forma cíclica e seqüencial a passagem de veículos e pedestres em uma interseção. Existem dois tipos de semáforos, os veiculares e os de pedestres. Eles diferem nas indicações luminosas e, portanto, nas mensagens que transmitem.

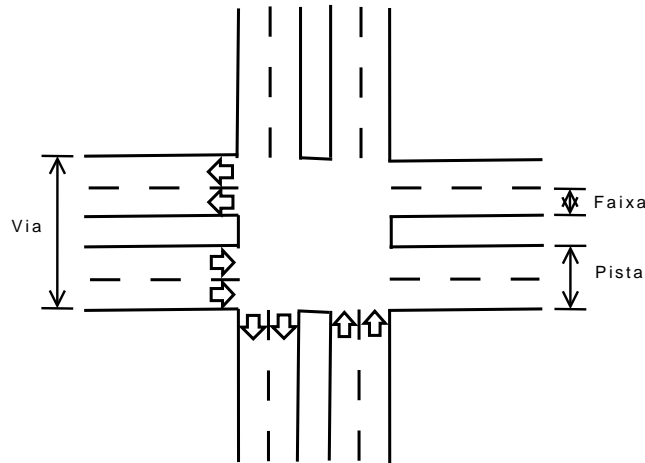


Figura 2.1 – Interseção Isolada

2.2 Fluxos Veiculares

O fluxo de veículos nas redes viárias pode ser caracterizado pelos conceitos definidos a seguir, que podem ser encontrados em (25), (15):

1. **fluxo (q)** - é o volume de tráfego expresso em veículos por hora. (Volumes observados por períodos de tempo inferiores a uma hora são geralmente expressos por taxas de fluxo horário equivalente).

$$q = \frac{N}{T}, \quad (2.1)$$

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

2. **velocidade de cruzeiro** - é considerada como a velocidade que os veículos atingem quando percorrem uma determinada distância sem que ocorram interrupções. Esta velocidade depende das condições geométricas das vias e das condições de tráfego.
3. **p.c.u.** - é uma unidade que dividida pelo tempo (hora) representa a unidade do fluxo de veículos. A unidade *p.c.u.* é muito utilizada em tráfego e significa *passenger-car units*. Um *p.c.u.* é equivalente a um veículo leve de passeio;
4. **volume** - é o número de veículos que passa por uma dada seção de uma via em um intervalo de tempo determinado;
5. **pelotão** - um grupo de veículos que atravessa uma via, sem que ocorra dispersão;
6. **fila** - é um grupo de veículos estacionário na linha de parada de uma via;
7. **fluxo de saturação** - é a máxima taxa segundo a qual os veículos podem passar por uma dada aproximação se o sinal verde estivesse disponível durante uma hora completa;

8. **taxa de chegada** - é a taxa segundo a qual os veículos chegam em uma determinada faixa de uma pista. Esta taxa pode ser considerada conhecida e constante, ou ainda, medida através de detectores podendo ser modelada por uma função exponencial, pulsada ou aleatória;
9. **taxa de descarga** - é a máxima taxa possível em que uma fila formada em uma faixa da pista é descarregada, esta taxa é igual ao fluxo de saturação enquanto existir fila a ser descarregada;
10. **grau de saturação** - pode ser definido como a relação entre o número médio de veículos que chegam ao cruzamento durante o ciclo através de uma faixa e o número máximo de veículos que podem ser atendidos pelo cruzamento através desta faixa durante um ciclo. Portanto, se o grau de saturação for maior que um, significa que chegam mais veículos do que podem ser atendidos naquela faixa. Se esta situação durar por muito tempo, as filas crescem e diz-se que o sistema está saturado;
11. **capacidade da interseção** - é o fluxo total máximo de veículos que pode passar através da interseção em condições operacionais, ou seja, a capacidade não é uma propriedade geométrica da interseção propriamente dita, mas de todos os elementos, envolvendo o controle e as condições de tráfego.

2.3 Elementos de Controle de Tráfego

Quando existem intersecções semaforizadas, seus tempos semafóricos devem ser ajustados por algum tipo de controle veicular. As variáveis que permitem este controle são (26):

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

$$g = k + y - o, \tag{2.2}$$

- 6. **ciclo** - é a repetição de uma série básica de combinações semafóricas para uma interseção. Sua duração é chamada de tempo de ciclo.
- 7. **tempo de ciclo (C)** - A Equação 2.3 aproxima o comprimento de ciclo de menor atraso para a interseção (27):

$$c_0 = \frac{1,5L + 5}{1 - Y_1 - Y_2 \dots - Y_n}, \tag{2.3}$$

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

- 8. **fase** - cada conjunto de movimentos comandados por uma mesma sequência de indicações luminosas nos estágios do ciclo, Figura 2.2;
- 9. **estágio** - parte de um ciclo durante o qual um grupo de movimentos têm permissão de passagem, Figura 2.2.

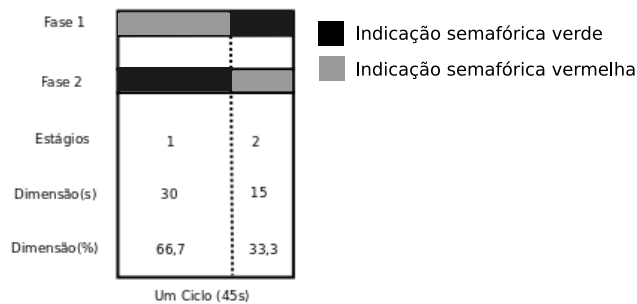


Figura 2.2 – Diagrama de Tempos

- 10. **entreverde** - é o intervalo de tempo entre estágios sucessivos (no qual ocorre a alteração do conjunto de movimentos autorizados e bloqueados);
- 11. **split ou porcentagem de verde** - é a forma como o ciclo está dividido entre os estágios; mais precisamente, é o conjunto de frações do ciclo atribuídas a cada estágio;
- 12. **offset ou defasagem absoluta** - é o instante do início do estágio um da interseção, medido em relação a um relógio de referência comum a todas as interseções de um sistema. O *offset* se aplica na sincronização entre interseções que são operadas de forma coordenada como um sistema.
- 13. **Tempo mínimo** - é o menor tempo de verde que deve ser considerado na interseção para garantir a travessia de veículos.

2.4 Otimização

A Otimização é a área da Matemática Aplicada que tem como objetivo o cálculo de valores ótimos para variáveis de decisão obedecendo a algum critério de desempenho, ao mesmo tempo que satisfaz restrições de um modelo matemático. A solução de um problema de otimização começa pela transformação do problema em um modelo e, posteriormente a implementação de um algoritmo capaz de encontrar uma solução adequada para o modelo (2).

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

A linguagem utilizada para expressar os problemas de maneira declarativa é conhecida como Programação Matemática (28). Os elementos de um modelo em Programação Matemática são:

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

2.4.1 Algoritmo Hill Climbing

O algoritmo *Hill Climbing*, começa com base em um cenário especificado pelo usuário, selecionado pelo programa usando critérios fixos, ou seleção randômica (29). Então, é selecionada a variável a ser otimizada (defasagem, comprimento de ciclo, etc.) e criados dois cenários adicionais para esta variável, um para incremento e outro para decremento do valor.

Inicialmente, o valor da variável selecionada é incrementado e decrementado por um valor específico chamado de tamanho de passo. Na sequência, o algoritmo usa o simulador de

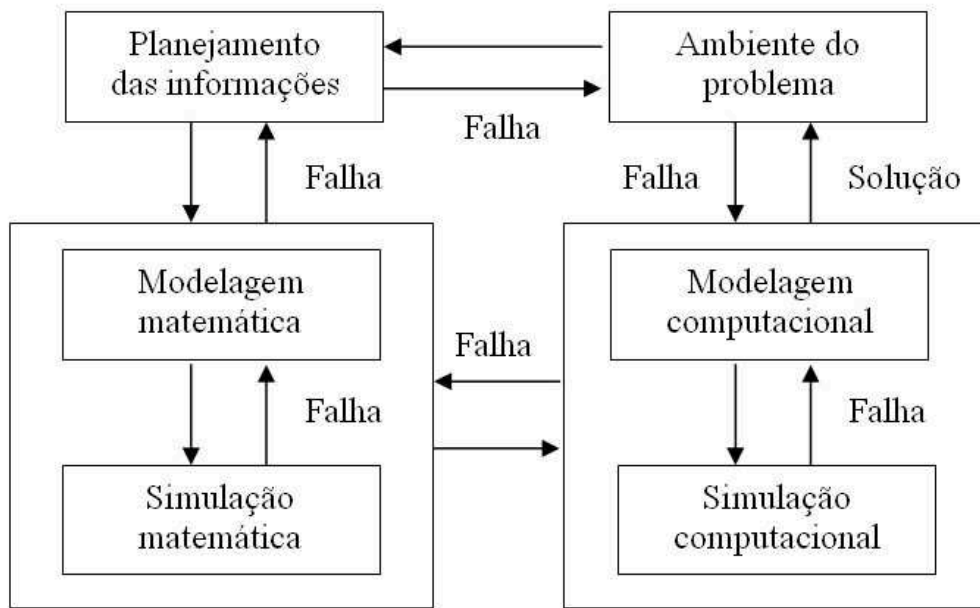


Figura 2.3 – Diagrama de Blocos do Processo de formulação e validação de um modelo matemático

tráfego para o cálculo do valor da variável de controle para cada um dos dois cenários e os compara com o cenário base. Estas avaliações identificam o melhor dos dois cenários e, conseqüentemente, a direção da busca adicional. Por exemplo, se o incremento do valor da variável selecionada resultar em um melhor valor, o algoritmo de busca marca o cenário correspondente como o melhor atual e continua procurando na direção de incrementar valores à variável. Na próxima iteração, o algoritmo de busca gera um novo cenário pelo incremento ou decremento no valor da variável na direção de busca selecionada, calculando o novo valor, e comparando-o com o melhor valor atual. O algoritmo continua desta maneira até cessar com o valor para o novo cenário melhor que o atual.

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

2.5 Modelo de Tráfego

Um modelo de tráfego deve descrever o comportamento da dinâmica dos veículos nas vias da área em estudo. Ele deve conter todas as características físicas das vias e uma descrição completa do plano de controle de tráfego como entrada. Então, ele avalia ou simula o cenário descrito e a eficácia das medidas de saída (29). Tipicamente estas medidas incluem: atraso médio ou total, número de paradas, consumo de combustível, eficiência da largura de banda,

filas médias ou máximas, etc. Muitos modelos fornecem uma estimativa de diversas, senão todas, as variáveis de saída.

2.5.1 Estratégia de Controle em Tempo Fixo

Este tipo de controle é fixo em termos de comprimento de ciclo e divisão de fase (30).

As estratégias de controle que trabalham com planos de tempo fixo são baseados em dados históricos da média da demanda de fluxo para um período de tempo em que este plano seja operacional. A elaboração destes planos é realizada através de contagens de veículos. Diferentes planos podem ser gerados para diferentes períodos do dia ou dias da semana para refletir o comportamento estatístico do fluxo de veículos.

No entanto, os planos fixos não se adaptam às alterações de demanda que ocorrem em tempo real no dia-a-dia do tráfego. Isto significa que a qualidade do controle de tempo fixo decresce à medida que a variância aumenta, pois quanto maior a variância, maior a dispersão dos dados de demanda histórica e a demanda verificada.

Esta dispersão poderia ser corrigida pela atualização dos planos de tempos fixos, mas esta prática envolve custos elevados, deixando de ser realizada por períodos extensos, às vezes anos, implicando na deterioração da otimização dos tempos semafóricos. Esta obsolescência dos planos semafóricos e a incapacidade de reação a fenômenos de curta duração tem motivado a implantação do controle atuado.

2.5.2 Estratégia de Controle Atuado

Os sistemas atuados, ou sistemas que variam conforme a demanda veicular são usados nos casos em que o tráfego não apresenta um comportamento cíclico, ocorrendo variações de volume veicular de um dia para o outro. Por meio da detecção de veículos, o sistema muda a programação do semáforo.

O princípio básico do funcionamento em modo atuado é o da variação do tempo de verde associado a um determinado estágio de sinalização entre um valor mínimo e um valor máximo, ambos programáveis. Para a determinação da variação do tempo de verde é necessário que se tenha em campo, além do controlador atuado, unidades detectoras de veículos.

O sistema de detecção consiste, em sua grande maioria, em um ou mais laços indutivos localizados sob a faixa de rolamento que são capazes de detectar a passagem de um veículo (massa metálica) sobre a via. Estas informações veiculares são enviadas ao controlador atuado que processa as informações provenientes dos detectores e, de acordo com o programa nele armazenado, realiza a tomada de decisão de prolongar ou encerrar o verde para uma determinada aproximação (31). Na operação atuada, cabe inicialmente à lógica do controlador determinar quanto tempo de verde deve ser dado para uma aproximação ou movimento.

Dependendo da necessidade e do volume existente na via que se deseja controlar, pode-se ter ainda a ação semi-atuada pelo tráfego (31). Este tipo de operação é recomendada para o caso de uma importante via a ser controlada apresentar os acessos laterais com volumes relativamente baixos. Neste tipo de sistema, são instalados detectores veiculares somente nos acessos laterais, a uma certa distância da faixa de retenção, de modo que, quando for detectado um certo número de veículos, o tempo de verde da via principal seja interrompido - diferentemente da totalmente atuada que necessita de detectores em todas as aproximações da interseção que se deseja controlar.

A categoria de controle atuado pode ser ainda subdividida em:

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

De acordo com (?), dentre as principais vantagens e desvantagens do uso de cada tipo de controlador destacam-se:

Controladores de tempo fixo - Vantagens:

- Os tempos semafóricos são facilmente ajustados no campo;
- Mais simples e mais barato;
- Podem operar com diferentes planos semafóricos de acordo com o horário, durante um mesmo dia;
- Em um sistema coordenado são, geralmente, eficientes para baixos volumes de tráfego.

Controladores de tempo fixo - Desvantagens:

- Não reconhecem, nem acomodam flutuações na demanda do tráfego;
- Podem causar excessivos atrasos, tanto para veículos como para pedestres;
- São necessários tempos de verde e comprimento do ciclo constantes.

Controladores atuados pelo tráfego - Vantagens:

- Fornecem operação contínua, inclusive com baixos volumes de tráfego;
- Geralmente reduzem o atraso e aumentam a capacidade da via;
- É ajustável à demanda e às flutuações do tráfego.

Controladores atuados pelo tráfego - Desvantagens

- Possuem altos custos de implantação e manutenção;

2.6 Ferramenta de cálculo TRANSYT

O TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*) é um programa para calcular *offline* tempos semafóricos otimizados em uma rede de tráfego. Desde a primeira estratégia desenvolvida em 1967, na Inglaterra (4), várias versões têm sido produzidas. A mais recente delas é o TRANSYT/13 que entra no mercado trazendo, entre outras inovações, um novo modelo de célula de transmissão, que apresenta a figura completa da localização de todo o tráfego na rede a qualquer instante do ciclo (32).

A ferramenta possui dois elementos centrais, como pode ser visto na Figura 2.4: o modelo de tráfego e a otimização do sinal.

Os dados de entrada do modelo de tráfego são características da rede, como: demanda fixa de veículos, número de interseções, número de vias, etc; e as indicações semafóricas iniciais. O modelo prediz o valor do índice de Desempenho (ID) para a rede, para qualquer plano de tempo fixo e ajusta a média de fluxo veicular. O ID é o custo total do congestionamento de tráfego e é sempre a combinação média do valor total do atraso com o número de paradas (33). Através do ID avalia-se o comportamento do tráfego (4).

Sendo um modelo *offline*, nenhuma detecção de veículos é requerida para implementar o TRANSYT. Entretanto, o fluxo de tráfego varia na rede entre dias e períodos do dia, então é usual desenvolver e programar uma linha de planos para fornecer esta variabilidade. Desta forma, estes planos podem ser usados como suplemento ou para substituir o plano selecionado em determinado momento do dia (5).

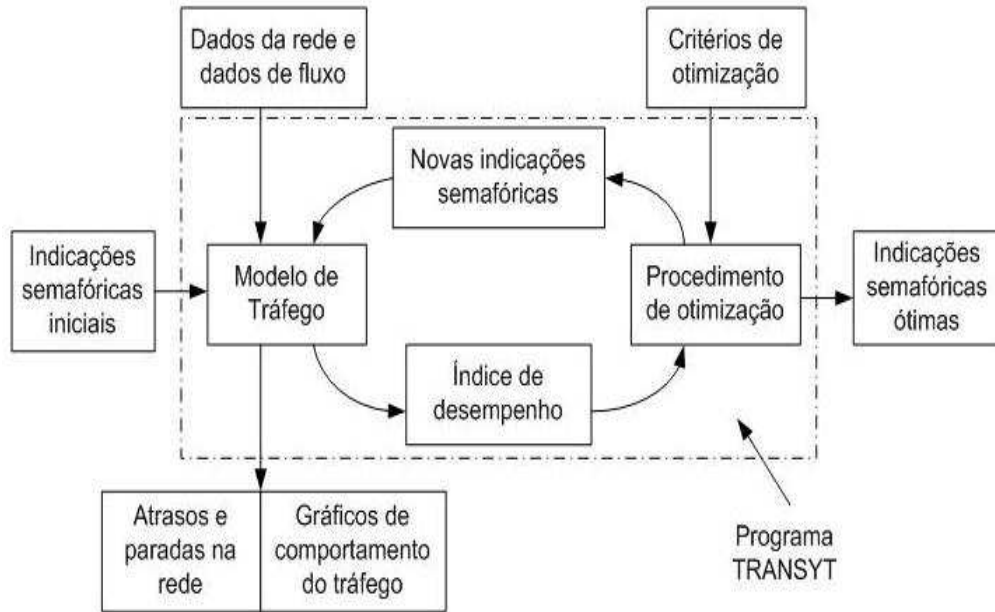


Figura 2.4 – Modelo do TRANSYT

O fluxo de tráfego por passo é representado em histogramas chamados de perfis de fluxo cíclicos (PFC). Estes perfis podem ser obtidos como uma saída gráfica opcional para o TRANSYT e são úteis na validação do modelo.

Existem três tipos de perfis: *IN-Profile*, *OUT-Profile* e *GO-Profile*, onde um indica sinal verde e zero representa o sinal vermelho. O primeiro, Figura 2.5, é o padrão de tráfego que chegaria à linha de parada no fim da via a jusante se o tráfego não fosse impedido pelo semáforo na linha de parada. O segundo, Figura 2.6, é o padrão de tráfego que deixa a via. O último, Figura 2.7, representa o padrão de tráfego que deixaria a linha de parada se existisse tráfego suficiente para saturar o verde.

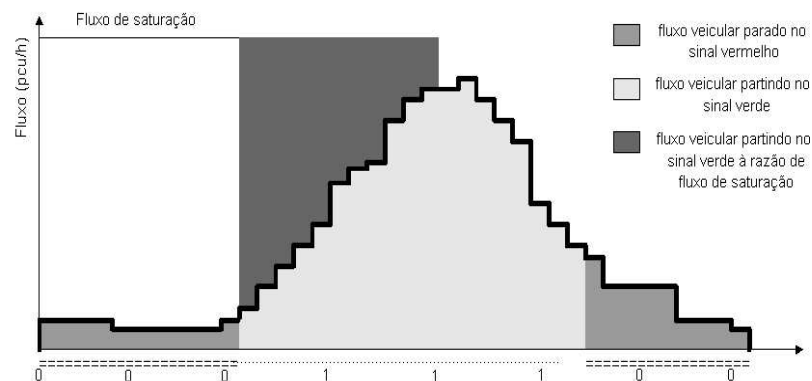


Figura 2.5 – Perfil IN-profile

O número de veículos (m_i) na linha de parada durante um intervalo de tempo i é calculado pela Equação 2.4:

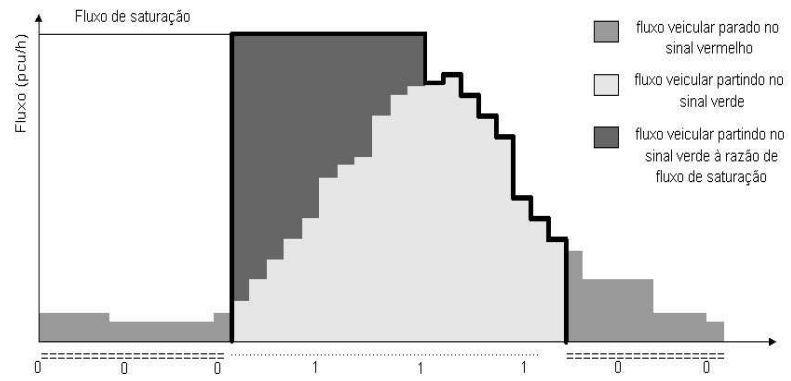


Figura 2.6 – Perfil OUT-Profile

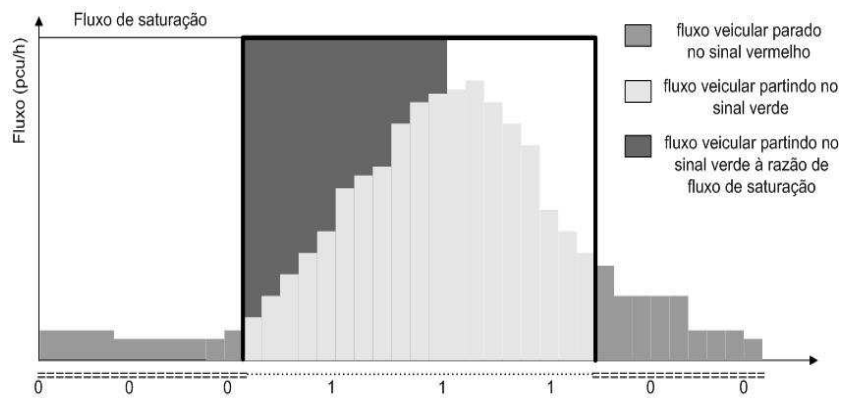


Figura 2.7 – Perfil GO-Profile

$$m_i = m_{i-1} + q_i - s_i, 0 \quad (2.4)$$

onde q_i é o número de veículos chegando em um intervalo i (dado pelo perfil *IN-Profile*), e s_i é o número máximo de veículos permitidos para sair durante um intervalo i (dado pelo perfil *GO-Profile*).

O número de veículos saindo da linha de parada em um intervalo de tempo i é dado pela Equação 2.5:

$$m_{i-1} + q_i - m_i, \quad (2.5)$$

Estes valores são usados para derivar o perfil *OUT-Profile*.

Os cálculos usando os perfis *IN-GO-OUT* são repetidos em cada via para dois ciclos. Começando com uma fila assumindo zero na linha de parada, o comportamento é modelado para o primeiro ciclo de forma a obter a condição inicial da fila para o segundo, ou seja, um ciclo típico. Durante este ciclo típico, o comportamento da fila cresce e decai, e consequentemente atrasa, representando assim o comportamento médio do tráfego durante o período em estudo (34).

O processo de otimização busca ajustes de tempo na rede que minimizem filas e atrasos. Ele é baseado na heurística *Hill Climbing*, pois os dados de demanda veicular são conhecidos antecipadamente (35). O otimizador modifica os tempos de defasagens que afetam a coordenação entre semáforos, e a duração do tempo individual do estágio de verde de cada junção (34).

O processo de otimização ajusta a temporização semaforica e verifica, usando o modelo, se os ajustes reduzem ou não o índice de desempenho. Adotando os ajustes que reduzem o índice de desempenho, a temporização é sucessivamente melhorada.

A estratégia TRANSYT assume as seguintes hipóteses a respeito do tráfego:

- As principais interseções na rede são semaforizadas ou controladas por uma regra de prioridade;
- Todos os semáforos da rede possuem tempo de ciclo comum ou metade deste valor, e detalhes dos estágios e valores mínimos são conhecidos;
- Para cada aproximação diferente entre interseções ou conversão em interseções, o fluxo médio é conhecido e constante.

Basicamente, o programa simula o comportamento dos veículos nos trechos de vias da rede. Através de uma função de otimização define os tempos ótimos de verde para cada fase

dos cruzamentos, bem como suas defasagens. A função objetivo utilizada é uma combinação linear do número de paradas e do atraso sofrido pelos veículos nas diversas aproximações da rede de interseções semaforizadas. O valor desta função objetivo é denominado de Índice de Desempenho, ou Performance Index (PI), definido pela 2.6.

$$PI = \sum_{i=1}^n (W w_i d_i + (K/100) k_i \cdot s_i), \quad (2.6)$$

onde W é o custo médio por unidade de atraso, w_i o coeficiente de ponderação de atraso no *link* i , d_i o atraso médio no *link* i , K o custo médio para 100 unidades de parada, k_i o coeficiente de ponderação do número de paradas no *link* i , s_i o número médio de paradas no *link* i e n o número de vias da rede.

O TRANSYT é capaz de simular um cenário de operação, avaliar medidas de desempenho, alterar defasagens entre os semáforos, reprocessar a simulação e reavaliar as medidas de desempenho até que atinjam um nível ótimo.

Na simulação os veículos são tratados como pelotões, e o comportamento do tráfego é de forma simplificada, já que o modelo de filas é vertical. A rede viária é simulada no programa como um conjunto de nós e links. Cada interseção semaforizada corresponde a um nó e a corrente de tráfego unidirecional entre dois nós consecutivos representa uma via (18).

De acordo com (?), o único parâmetro para a calibração do TRANSYT é o Fator de Dispersão de Pelotões (PDF), constante empírica que depende das características da via. Para cada passo, o fluxo de chegada em uma linha de parada de um nó é determinado pela 4.2.

$$F = 1/[1 + (K_t/100)], \quad (2.7)$$

onde F é o fator de dispersão de pelotões, t o tempo médio para atravessar a via (valor empírico), geralmente 0,8, por tempo amostral e K coeficiente do fator de dispersão.

Esse parâmetro é utilizado pelo TRANSYT para representar o deslocamento dos veículos e calcular as medidas de desempenho, e pode variar no intervalo de zero a um. A interpretação dos valores do PDF é apresentada no Manual do Usuário apud (?), e estabelece intervalos de acordo com a característica da via: valores acima de 0,5 indicam presença de estacionamentos, conversões moderadas a pesadas e tráfego de pedestres, típico de uma via urbana; valores entre 0,35 e 0,50 representam via com algumas conversões e fraco fluxo de pedestres; vias com PDF inferior a 0,25 são aquelas que não sofrem interferências no fluxo de veículos (presença de estacionamentos, retornos, tráfego de pedestres, dentre outras), e, portanto, não consideradas neste estudo.

2.6.1 Atrasos

O atraso total para o tráfego em uma via é a soma de todos os atrasos individuais dos veículos utilizando esta via durante um intervalo de tempo. A unidade de atraso é expressa veículo-horas por hora (pcu-h/h). Isto é estritamente utilizado para idealizar o comportamento dos veículos que é assumido pelo TRANSYT. Contudo, esta interpretação apresenta uma razoável aproximação da realidade. Similarmente, a taxa do atraso total em uma rede de sinais de trânsito pode ser considerada como a soma das médias das filas em todas as linhas de paradas. No TRANSYT, a taxa do atraso total para o tráfego em uma via é obtido parcialmente a partir dos perfis de fluxo cíclicos (atraso uniforme) e parcialmente através da 2.8:

$$\text{Atraso Aleatório} + \text{Supersaturação} = T/4[(f - F)^2 + 4f/T]^{0,5} + (f - F), \quad (2.8)$$

onde f é a razão de chegada média na via (pcu/h), F é o fluxo máximo que pode ser descarregado de uma via (pcu/h), F e f são aproximadamente iguais. T é a duração da condição de fluxo para cada temporização semafórica considerada (h).

A taxa do atraso aleatório é extremamente sensível a pequenos erros e também aos valores do fluxo. Esta sensibilidade reflete o comportamento real do tráfego. Enquanto as estimativas dos atrasos aleatórios e de supersaturação correspondem ao comportamento real do tráfego, estas também servem para impedir o otimizador de sinais para seleção da duração de verde que possuam baixa ou nenhuma capacidade de reposição. Isto é importante, por exemplo, onde o tempo de verde de um lado de uma via precisa ser reduzido de forma a fornecer uma melhor coordenação ao longo do corredor; com o tempo de verde de um lado da via reduzido, o atraso aleatório + supersaturação aumentam e deve-se prevenir o otimizador de escolher indevidamente os tempos de verde (34).

Atraso Uniforme - Para vias nas quais as chegadas do tráfego não excedam sua capacidade, a fila média corresponde a taxa na qual o atraso incorre em um padrão identico de chegadas do tráfego durante cada ciclo. Esta componente da fila e modelo de atraso é chamada de "taxa de atraso uniforme".

Atraso de Supersaturação - Em vias nas quais as chegadas do tráfego excedam a capacidade, a fila de tráfego aumenta a cada ciclo com a quantidade na qual as chegadas excedam as partidas ao longo do período de supersaturação. Assim, o atraso uniforme durante um ciclo típico não considera este atraso adicional devido ao constante aumento das filas. No TRANSYT, a "taxa de atraso de supersaturação" é calculada como a média do valor desta fila de supersaturação durante qualquer período que esteja sendo modelado. Assim, a fila é zero no início do período de modelagem e o dobro da média no final.

Atraso Aleatório - Um elemento adicional do atraso não considerado para o cálculo do atraso uniforme é aquele devido a variações nas chegadas do tráfego de ciclo para ciclo. Esta parcela é conhecida como atraso aleatório. Este pode ser convenientemente relacionado como o número médio de unidades de carros de passeio que ficam retidos durante o tempo de verde, e conseqüentemente, formam uma fila que se segue até o período de vermelho. Em vias onde as chegadas excedem as saídas, um aumento uniforme da fila de supersaturação também deve ser adicionado na fila média aleatória para uma dada fila no início do vermelho.

Atraso Total - O atraso total é obtido através da soma do atraso sofrido por cada via, e é composto pelas seguintes parcelas: atraso uniforme e atraso aleatório + supersaturação.

De acordo com (31), o TRANSYT simplifica o comportamento do tráfego assumindo que os veículos nas vias não sofrem atraso até a chegada na linha de retenção, ou ao fim da fila, quando a indicação semafórica está vermelha. Caso a fila ainda não tenha descarregado totalmente, o tráfego de chegada sofrerá uma parada instantânea. Assume-se ainda que a fila é descarregada a partir da linha de retenção, durante o período de verde efetivo, atingindo instantaneamente a velocidade de cruzeiro. Deste modo, os instantes dentro do ciclo nos quais os veículos se unem e deixam a fila são, portanto, deslocados para definir o verde efetivo, ou período (verde + amarelo) que é realmente usado pelo tráfego, conforme Figura 2.8.

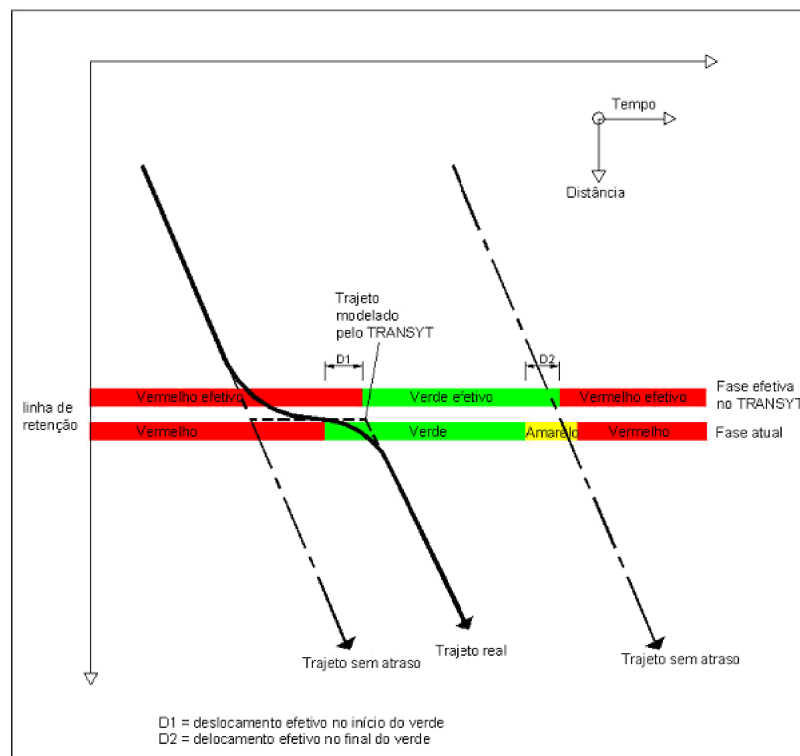


Figura 2.8 – Modelagem do comportamento do tráfego no TRANSYT

O TRANSYT modela a resposta do tráfego à sinalização usando o conceito de tempo

de verde efetivo. É considerado um período de 3 segundos, em média, ao início do estágio de verde, e também cerca de 2 segundos ao fim deste estágio. Estes períodos representam a inércia dos motoristas e veículos às indicações semaforicas. O TRANSYT considera paradas e saídas instantâneas, ou seja, considera que o tempo gasto para um carro sair do repouso e atingir a velocidade de cruzeiro é zero. Deste modo, os deslocamentos e o conceito de tempo de verde efetivo compensam as paradas e saídas instantâneas.

O deslocamento de fim do estágio de verde representa o sinal amarelo, incluindo não só o tempo gasto na desaceleração dos carros que param, mas também o conceito de verde efetivo, para os motoristas que passam durante esse sinal.

O número de paradas é obtido com a relação entre o número de veículos que são forçados a parar ou desacelerar ao se aproximarem da interseção, e o número total de veículos que atravessam o cruzamento. Assim, o número médio de paradas é definido como sendo o número médio de vezes que os veículos param ao cruzar a interseção (36).

Referências

- [1] CARDOSO, C. E. P. *Análise do Transporte Coletivo Urbano sob a Ótica dos Riscos e Carências Sociais*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2007.
- [2] ENDO, W. *Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano Baseado em Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, Dezembro 2006.
- [3] GARTNER, N. H. Optimized policies for adaptive control. In: WORKSHOP ON ADAPTIVE TRAFFIC SIGNAL CONTROL SYSTEMS TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Washington D.C., 2001.
- [4] ROBERTSON, D. I. TRANSYT: A traffic network study tool. In: ROAD RESEARCH LABORATORY. Crowthorne, England, 1968.
- [5] HOUNSELL, N.; MCDONALD, M. Urban network traffic control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Prof Eng Publishing, v. 215, n. 4, p. 325–334, 2001.
- [6] BRITO, R. M. *Desenvolvimento de um Simulador para análise e projeto de Sistemas de Controle de Tráfego em Malha Fechada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2000.
- [7] FARGES, J. L.; KAMDEM, I.; LESORT, J. B. *Realization and Test of a Prototype for Real Time Urban Traffic Control*. [S.l.], 1991.

-
- [8] GARTNER, N. H. OPAC: A demand responsive strategy for traffic signal control. In: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD. [S.l.], 1983. v. 906, p. 75–81.
- [9] MIRCHANDANI, P.; HEAD, L. Rhodes: A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis. *Transportation Research – Part C*, v. 8, p. 105–114, 2001.
- [10] BUSTAMANTE, R. *Transporte Público Coletivo em Bogotá, do Sistema Tradicional ao Transmilênio: Um Mercado em Transição*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007.
- [11] GOMIDE, A. de Ávila. *Transporte Urbano e Inclusão Social: Elementos para Políticas Públicas*. Brasília, Julho 2003.
- [12] CMTU. *Companhia Municipal de Trânsito e Urbanização - CMTU*. - Acesso em: 05/04/2010 2010. Transporte coletivo. [Http://www.cmtuld.com.br](http://www.cmtuld.com.br).
- [13] DETRAN. *Departamento de Trânsito do Paraná - Detran*. - Acesso em: 20/04/2010 2010. Estatísticas de Trânsito. [Http://www.detrان.pr.gov.br](http://www.detrان.pr.gov.br).
- [14] CMTU. *Companhia Municipal de Trânsito e Urbanização - CMTU*. - Acesso em: 05/04/2010 2010. Semáforos. [Http://www.cmtuld.com.br](http://www.cmtuld.com.br).
- [15] MOREIRA, R. B. *Uma contribuição para avaliação do modelo CORSIM em simulações de Tráfego urbano no Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado) — COPPE/URFJ, 2005.
- [16] FOLHA. *Folha de Londrina - Londrina*. - Acesso em: 05/04/2010 2010. Londrina: trânsito terá faixa exclusiva para ônibus - 25/03/2010. [Http://www.bonde.com.br](http://www.bonde.com.br).
- [17] DAVID, R. K. *Desenvolvimento Tecnológico na Modernização do Transporte Metropolitano de Passageiros*. [S.l.], 2005.
- [18] POYARES, C. *Critérios para análise dos efeitos de políticas de restrição ao uso de automóveis em áreas centrais*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia em Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2000.
- [19] ZHANG, Y. *An Evaluation of Transit Signal Priority and SCOOT Adaptive Signal Control*. Dissertação (Mestrado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.
- [20] WOOD, K. Urban traffic control, systems review. *Transport Research Laboratory*, Project report 41, 1993.
- [21] SKABARDONIS, A. Control strategies for transit priority. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Trans Res Board, v. 1727, n. - 1, p. 20–26, 2000.

- [22] LOUREIRO, C.; GOMES, M.; LEANDRO, C. Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de interseções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real. In: *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 365–376.
- [23] ECHEVERRY, J.; IBÁÑEZ, A.; MOYA, A. Una evaluación económica del sistema TransMilenio. *Facultad de Economía, Universidad de los Andes*. URL: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/rev21art7.pdf>, 2007.
- [24] URBS. *URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S/A*. - Acesso em: 05/04/2010 2010. HISTÓRIA DO TRANSPORTE COLETIVO DE CURITIBA. <Http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/PORTAL/historiadotransportecoletivo.php>.
- [25] CERVANTES, S. G. S. *Um Algoritmo Descentralizado para Controle de Tráfego Urbano em Tempo Real*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Agosto 2005.
- [26] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). *Manual de Semáforos*. Segunda edição. Brasília, Brasil, 1984.
- [27] WEBSTER, F. V. *Traffic Signal Settings*. Department of Scientific and Industrial Research, 1969.
- [28] WILLIAMS, H. P. *Model Building in Mathematical Programming*. New York, NY: John Wiley and Sons, 1999.
- [29] PIAI, J. C. *Um algoritmo em tempo fixo para controle de Tráfego urbano*. Londrina, Paraná: [s.n.], Novembro 2006. Trabalho de conclusão de curso.
- [30] TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE. *PASSER V*. Texas, United States, 2006.
- [31] OLIVEIRA, F. M. N. *APriorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Outubro 2004.
- [32] BINNING, J.; BURTENSHAW, G. Green light for transyt 13. *Traffic Software News*, March 2008.
- [33] RAKHA, H.; AERDE, M. V. Comparison of simulation modules of TRANSYT and INTEGRATION models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Trans Res Board, v. 1566, n. -1, p. 1–7, 1996.
- [34] CRABTREE, M.; VINCENT, R.; HARRISON, S. Transyt/10 user guide. *Application guide-Transport Reseach Laboratory*, Transport Research Laboratory, 1996.
- [35] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in search optimization and machine learning*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

- [36] BARRA, I. N. *Análise das Prioridades para as Altas Porcentagens de Ônibus nos Planos de Sincronismo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dezembro 1999.

Objetivos

3.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação do desempenho operacional dos planos semaforicos otimizados em uma subrede da malha viária central da cidade de Londrina.

3.2 Específicos

- Avaliar a eficiência semaforica antes e depois da implantação de corredores exclusivos de tráfego para ônibus e taxis com passageiros;
- Disponibilizar material para subsidiar a discussão em torno das atuais mudanças que ocorrem na cidade de Londrina.

Artigo para Publicação

Aplicação da ferramenta TRANSYT/10 na otimização semafórica em corredores viários na cidade de Londrina

Resumo

Este trabalho apresenta uma aplicação da ferramenta TRANSYT/10, na avaliação do desempenho operacional do controle semafórico em três dos principais corredores arteriais da malha viária central da cidade de Londrina. A motivação deste estudo é a recorrência de congestionamento em alguns corredores desta malha viária, assim como o período de transição na criação de corredores exclusivos para ônibus. Esta alteração implica no aumento da capacidade das vias, com a retirada das faixas de estacionamento. O software TRANSYT/10 é uma ferramenta amplamente utilizada em diversos países no gerenciamento de tráfego urbano. No contexto de planejamento e gerenciamento desta malha, o controle otimizado dos semáforos, ainda inexistente, possibilita a minimização do atraso e número de paradas. A avaliação de diferentes cenários, com e sem faixas exclusivas, diferentes tamanhos de ciclo e otimização do tempo de verde e defasagem confirmam que é possível melhorar as condições de tráfego para ambos os usuários de transporte coletivo e automóveis.

4.1 Introdução

As redes de infra-estruturas de transportes são um meio essencial através das quais as funções das cidades (centros de atividades econômicas e de serviços) podem ser realizadas. Também servem de ligação entre as cidades e os seus subúrbios, regiões envolventes e outras áreas urbanas. No entanto, a necessidade crescente de mobilidade nas sociedades modernas criou uma situação de sobrecarga em muitos sistemas de transportes, onde a infra-estrutura existente é incapaz de atender as mais diversas necessidades vigentes (37).

Inserido neste contexto, o desenvolvimento deste trabalho ocorre em um momento histórico do gerenciamento de tráfego da cidade de Londrina. Situada ao norte do Paraná, Londrina apresenta população superior a 500 mil habitantes e frota registrada que ultrapassa 273 mil veículos. Devido a recorrência de congestionamentos em alguns dos principais corredores arteriais da malha central, e seu conseqüente impacto de cunho econômico, social e ambiental, a administração pública decidiu pela implantação de corredores exclusivos para ônibus através da remoção da faixa de estacionamento de algumas vias.

Na cidade de Londrina, o ônibus é o único meio de transporte público coletivo disponível. Este não possui qualquer tratamento preferencial, operando no tráfego misto e disputando espaço com os demais veículos. A maioria das vias pelas quais os ônibus circulam têm como característica a intensa circulação de veículos e a formação de filas nos sucessivos cruzamentos semaforizados. Para este panorama, existem disponíveis várias estratégias desenvolvidas para melhorar ou otimizar o controle dos tempos semafóricos: simples controladores locais temporizados até sistemas de controle da malha viária que dependem de uma central inteligente para resposta em tempo real à demanda exigida pela malha (38).

Poucas cidades brasileiras possuem infra-estrutura para a implantação e gerenciamento de centrais de controle de tráfego urbano em tempo real. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de baixo custo para minimização do atraso, utilizando a infraestrutura semafórica existente, composta em sua grande maioria de controladores semafóricos eletromecânicos.

Para realização da otimização semafórica optou-se pela utilização do *software* TRANSYT/10 (licença acadêmica). Sendo este uma das mais consagradas estratégias utilizadas internacionalmente para determinação dos planos semafóricos de tempo fixo objeto deste estudo.

O TRANSYT/10 utiliza um modelo de tráfego e um algoritmo de otimização para coordenação semafórica. Nele considera-se um importante parâmetro de calibração: o fator de dispersão de pelotões. A otimização e simulação do tráfego baseia-se no fenômeno de espalhamento de grupos de veículos (dispersão) ao longo de interseções sucessivas, e não no deslocamento individual de veículos (39).

4.2 Ferramenta de controle

O *software* TRANSYT/10 permite o estudo de planos semafóricos otimizados e coordenados. O método possui dois elementos principais: o modelo de tráfego e o otimizador de sinais (40).

O modelo representa o comportamento do tráfego em uma rede na qual a maioria das interseções são controladas por semáforos. O critério de desempenho é uma combinação ponderada do atraso total e do número de paradas, sendo ele uma medida do custo total de

congestionamento do tráfego. O processo de otimização busca valores de temporização semaforica. Com estes valores calcula-se o índice de desempenho utilizando o modelo de tráfego. Depois, verifica-se se os ajustes reduzem ou não este índice de desempenho. Adotando-se os ajustes que reduzem o índice de desempenho, a temporização é sucessivamente melhorada.

No modelo TRANSYT/10 são assumidas as seguintes hipóteses a respeito do tráfego:

- As principais interseções na rede são semaforizadas ou controladas por uma regra de prioridade;
- Todos os semáforos da rede possuem tempo de ciclo comum ou metade deste valor e detalhes dos estágios e valores mínimos são conhecidos;
- Para cada aproximação diferente entre interseções ou conversão em interseções, o fluxo médio é conhecido e constante.

O TRANSYT/10 é capaz de simular um cenário de operação, avaliar medidas de desempenho, alterar defasagens entre os semáforos, reprocessar a simulação e reavaliar as medidas de desempenho até que seja obtido um valor ótimo (39).

A função objetivo utilizada é uma combinação linear do número de paradas e do atraso sofrido pelos veículos nas diversas aproximações da rede de interseções semaforizadas. O valor desta função objetivo é denominado de Índice de Desempenho, ou Performance Index (PI), definido pela Equação 4.1.

$$PI = \sum_{i=1}^n (Ww_i d_i + ((K/100)k_i \cdot s_i), \quad (4.1)$$

onde W é o custo médio por unidade de atraso, w_i o coeficiente de ponderação de atraso na via i , d_i o atraso médio na via i , K o custo médio para 100 unidades de parada, k_i o coeficiente de ponderação do número de paradas na via i , s_i o número médio de paradas na via i e n o número de vias da rede.

A simulação considera os veículos como pelotões, e o comportamento do tráfego de forma simplificada, já que nesse modelo as filas de veículos são verticais sobre a linha de retenção. A rede viária é simulada no programa como um conjunto de nós e vias. Cada interseção semaforizada corresponde a um nó e a corrente de tráfego unidirecional entre dois nós consecutivos representa uma via (41), (42).

De acordo com (39), o único parâmetro para a calibração do TRANSYT/10 é o Fator de Dispersão de Pelotões (PDF), constante empírica que depende das características da via. Para cada passo, o fluxo de chegada em uma linha de parada de um nó é determinado pela 4.2.

$$F = 1/[1 + (K_t/100)], \quad (4.2)$$

onde F é o fator de dispersão de pelotões, t o tempo médio para atravessar a via (valor empírico), geralmente 0,8, por tempo amostral e K coeficiente do fator de dispersão.

O processo de otimização é baseado na heurística *Hill Climbing*, pois os dados de demanda veicular são conhecidos antecipadamente. Os dados necessários para otimização, ou seja, as restrições do sistema, são os valores mínimos dos tempos de verde, ciclo e os custos. Os tempos semafóricos são ajustados inicialmente e, aplicados ao modelo de tráfego, calcula-se o tempo de ajuste que promove o melhor ID. Por adoções sucessivas de tempos benéficos, o ótimo é encontrado. Este valor ótimo é aplicado ao modelo de tráfego que apresenta o comportamento veicular otimizado nas vias (43).

4.2.1 Caracterização das Vias em Estudo

Como objeto desta pesquisa, foram escolhidos para avaliação os mesmos corredores nos quais a administração pública de Londrina optou pela criação de faixas exclusivas de ônibus. Estes corredores possuem as seguintes características comuns: trechos entre semáforos de 100 metros, sentido único de tráfego e alinhamento praticamente retilíneo, pistas com 9 metros de largura, divididas em duas faixas de rolamento e uma faixa de estacionamento à esquerda e grande circulação de ônibus, além de:

1. Trecho 1: a Rua Benjamin Constant possui comprimento de aproximadamente 800 metros divididos em 8 interseções semaforizadas.
2. Trecho 2: a Rua Prof. João Cândido, possui comprimento de aproximadamente 700 metros divididos em 7 interseções semaforizadas.
3. Trecho 3: a Av. Duque de Caxias, possui comprimento de aproximadamente 600 metros divididos em 6 interseções semaforizadas.

A Figura 4.4 mostra a representação esquematizada da substituição das faixas exclusivas de estacionamento pelos corredores para ônibus nas três vias onde ocorrerá tal implantação.

O controle semafórico é efetuado por equipamentos eletromecânicos de plano único. Até o mês de março de 2010, o ciclo semafórico era de 45 segundos para todas as interseções, com defasagem de 6 segundos, porém não adequada para gerar coordenação (onda verde) entre as interseções.

No entanto, a partir desta data o órgão responsável pelo controle e gerenciamento semafórico, alterou o tempo de ciclo para 75 segundos na Rua Professor João Cândido e no caso das Av. Duque de Caxias e Rua Benjamin Constant, ciclos de 60 e 75 segundos, com tempo de amarelo variando entre 2 e 3 segundos.

Estas vias apresentam intenso fluxo de ônibus em circulação, e não possuem atualmente corredores exclusivos para tal. Os pontos de parada de ônibus não possuem baias,



Figura 4.1 – Rua Benjamin Constant



Figura 4.2 – Rua Professor João Cândido



Figura 4.3 – Av. Duque de Caxias

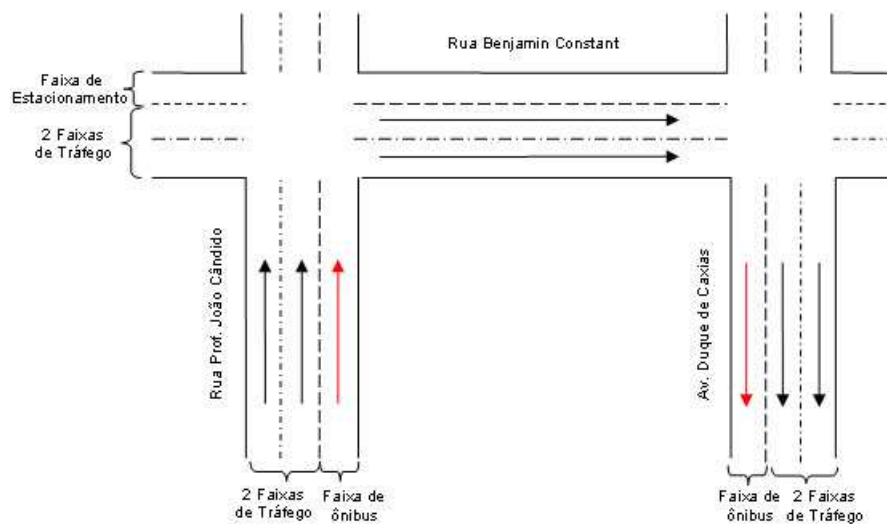


Figura 4.4 – Representação da situação atual das faixas de tráfego nas vias em estudo

observando-se o bloqueio total da faixa de rolamento da direita durante as operações de embarque/desembarque de passageiros.

Com base nos dados fornecidos pelo IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina - Diretoria de Trânsito e Sistema Viário) foi possível obter das contagens classificadas os fluxos de veículos que trafegam pelas interseções destes três corredores selecionados. Para efeito deste estudo, considerou-se apenas o período de maior movimentação do dia - das dezessete horas e quarenta e cinco minutos às dezoito horas e quarenta e cinco minutos - e também a separação entre a quantidade de veículos de passeio e de ônibus. A escolha deste período se dá em função desta subrede possuir em sua maioria semáforos eletromecânicos, por esta razão, somente uma programação semafórica é permitida. Assim, optou-se por calcular os tempos semafóricos para o pior caso, ou seja o de maior demanda veicular.

Como exemplo, a Tabela 4.1 mostra os fluxos verificados em duas interseções de conexão dos trechos em estudo: Rua Benjamin Constant com Rua Prof. João Cândido e Av. Duque de Caxias com Rua Benjamin Constant. Considerando tratar-se de vias com sentido único de circulação, os movimentos observados separadamente foram de fluxo direto e de conversões à direita e à esquerda.

Tabela 4.1 – Fluxos de tráfego por períodos do dia (veic/h).

R.Benjamin Constant(Oeste-Leste)				R.Prof. João Candido(Sul-Norte)				Total
Fluxo direto		Conversão Esquerda		Fluxo direto		Conversão Direita		
Passeio	Ônibus	Passeio	Ônibus	Passeio	Ônibus	Passeio	Ônibus	
462	110	155	27	791	5	125	99	
Av.Duque de Caxias(Norte-Sul)				R.Benjamin Constant (Oeste-Leste)				Total
Fluxo direto		Conversão Esquerda		Fluxo direto		Conversão Direita		
Passeio	Ônibus	Passeio	Ônibus	Passeio	Ônibus	Passeio	Ônibus	
818	42	16	0	430	42	273	29	

Fonte: Contagens IPPUL 2008

De acordo com os dados fornecidos pelo CMTU - Companhia Municipal de Trânsito e Urbanização (44) foi efetuada pesquisa visando avaliar o fluxo veicular de coletivos e seu conseqüente tempo gasto para percorrer um determinado percurso na Av. Benjamin Constant (desde a Rua Hugo Cabral até a Av. Brasil). De acordo com a pesquisa, um coletivo gasta em média 09 minutos e 11 segundos para percorrer o trecho em referência no período das 18:00h.

A região central de Londrina, com as vias estudadas em destaque é apresentada na Figura 4.5.

O *software* TRANSYT/10 representa rede viária como um conjunto de nós e *links*. Cada interseção semaforizada corresponde a um nó e a corrente de tráfego unidirecional entre dois nós consecutivos representa um *link*, conforme Figura 4.6. A numeração dos *links* inicia-se pelo número do nó de destino e finaliza-se de acordo com a direção do movimento, seguindo

CAPÍTULO 4. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA TRANSYT/10 NA OTIMIZAÇÃO SEMAFÓRICA EM CORREDORES VIÁRIOS NA CIDADE DE LONDRINA

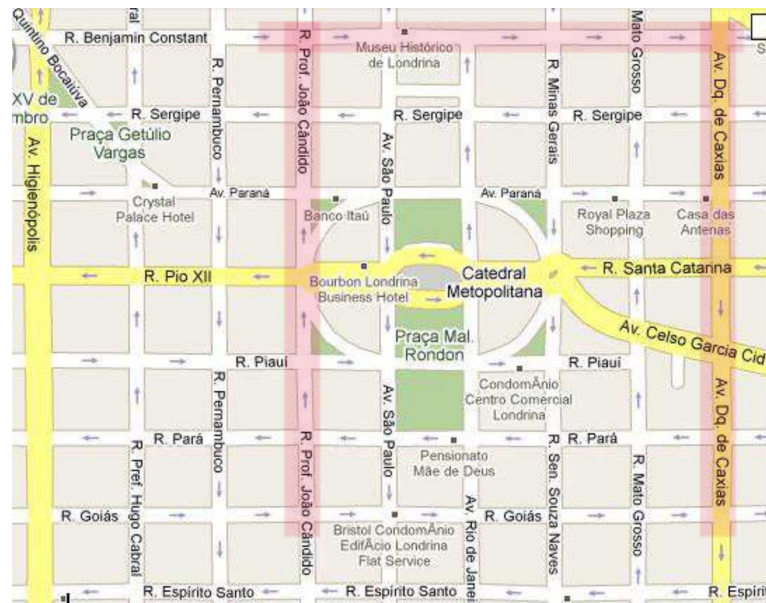


Figura 4.5 – Malha Central da Cidade de Londrina, Fonte: Google Maps, 2010

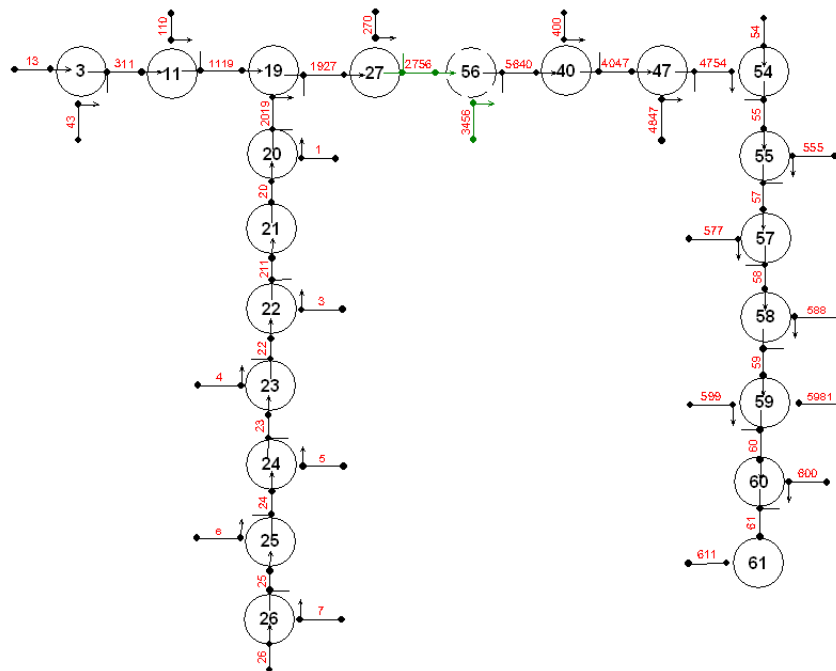


Figura 4.6 – Representação da rede no TRANSYT/10

padrões recomendados no manual do programa ou seguindo definição específica do usuário (39).

4.3 Metodologia

Foram realizadas simulações para avaliação de desempenho frente a diferentes tamanhos de ciclo e otimização de tempos de verde e defasagens. Os cenários escolhidos são apresentado na Tabela 4.2. O cenário 1 representa as condições de controle semafórico vigente nas vias em estudo no início deste trabalho ou seja, programação em tempo fixo convencional, com plano único local, não coordenado. Os tempos semafóricos, defasagens e ciclo implementados de forma empírica ficaram vigentes até o mês de março de 2010, com pequenas adequações em alguns pontos críticos. A escolha dos cenários de 2 a 7 foi baseada na evolução do estudo e de informações obtidas com os operadores que implementaram as modificações a partir do mês março de 2010. Assim, foram simulados os tamanhos de ciclo implementados nos corredores em estudo, com e sem a transformação da faixa de estacionamento em faixa de rolagem, pois estes cenários vêm sendo implantados nos corredores em estudo.

Tabela 4.2 – Cenários de avaliação

	Cenários						
	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de ciclo (s)	45	45	45	60	60	75	75
Otimiz. verde/defasagem	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Faixas de fluxo geral	2	2	2	2	2	2	2
Faixa de estacionamento	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
Faixa de ônibus	Não	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim

O contexto avaliado representa uma situação muito comum nas médias e grandes cidades brasileiras, onde importantes corredores viários operam com planos semafóricos únicos e não coordenados, e deseja-se avaliar qual a melhor opção para melhorar seu desempenho operacional, minimizando congestionamentos.

O modelo de otimização do TRANSYT calcula o índice de desempenho da rede e, através da heurística Hill Climbing (45), determina o tempo de verde e a defasagem ótima, reduzindo assim o atraso veicular.

4.3.1 Dados Utilizados

Para a caracterização das interseções, foram utilizados os dados de contagens manuais veiculares realizadas no ano de 2008 pelo IPPUL. Neste levantamento, verificou-se o comportamento do tráfego nos dias úteis da semana, durante o período das 07:00 horas até as 19:00 horas. Em adicional, foram obtidos também junto ao IPPUL os planos semafóricos além dos

seguintes dados: largura das vias, número de faixas existentes, distâncias entre as interseções, tempos de ciclo e defasagem.

Para ajuste do plano original, foram inseridas como dados iniciais no TRANSYT/10, as seguintes informações: os tempos semafóricos, defasagens, configurações da rede (disposição dos nós e vias, vias compartilhadas), fluxo de saturação para cada nó, velocidades, fator de dispersão de pelotões, fluxo correspondente a via, entre outros dados trabalhados. Com a calibração do TRANSYT/10, calculou-se o valor do atraso para os trechos estudados.

Para avaliação dos cenários 1, 2, 4 e 6, onde opera-se tráfego misto, foi adotada a velocidade média 20 km/h para ambos automóveis e ônibus. Para os cenários 3, 5 e 7, onde avaliou-se a adoção de uma faixa de rolagem exclusiva para ônibus foram adotadas as velocidades médias de 40 km/h para os automóveis, pois esta é a velocidade permitida para circulação nas vias centrais da cidade e 20 km/h para os ônibus, considerando uma velocidade média já que o tempo de parada dos mesmos não foi considerado na simulação.

O fluxo de saturação é igual a 0,5 veículos por amostra de tempo (tempo amostral igual a 1 segundo), também considerado conhecido e constante para todas as vias. A capacidade das vias considerada foi de 1800 veículos por hora (vph) em cada faixa.

Levando-se em consideração a proposta de remoção da faixa de estacionamento, e conseqüente aumento de uma faixa adicional, nos cenários compostos por 3 faixas aumentou-se a capacidade das vias para 5400 veículos por hora. Os ciclos aplicados foram de 45, 60 e 75 segundos e o horizonte T de simulação é de 60 minutos.

Os fluxos de tráfego foram transformados convertendo-se a equivalência em unidades carros de passeio (ucp) conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Equivalente em carros de passageiros de alguns tipos de veículos

Tipo de veículo	
Veículos pesados e médios	1,75
Ônibus	2,25
Veículos leves	1,00
Motocicletas	0,33
Bicicletas	0,20

Fonte: Belloni, 1983

4.4 Resultados

Considerou-se os índices de desempenho para condições de alto carregamento. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4 permitem a comparação entre as diversas medidas de desempenho obtidas para cada cenário de operação.

Tabela 4.4 – Medidas de desempenho da rede

	Cenários						
	1	2	3	4	5	6	7
Tempo total gasto(pcu-h/h)	436,5	412,4	165,6	310,4	181,5	331,3	196,8
Velocidade média(km/h)	9,3	9,8	23,8	14,2	21,7	13,3	20
Atraso uniforme(pcu-h/h)	73,6	53,8	39,3	88,9	53,0	107,1	67,7
Atraso aleatório(pcu-h/h)	160,2	155,6	12,3	25,9	14,3	28,7	15,1
Atraso total (pcu-h/h)	233,8	209,3	51,5	114,8	67,3	135,8	82,7

O melhor resultado foi obtido no cenário 3, no entanto este resultado é próximo ao cenário 5 e 7, o que reafirma a necessidade de um planejamento urbano estratégico onde o aumento da frota veicular encontre o respectivo aumento de capacidade das vias, sem descartar a necessidade da otimização semafórica sincronizada. Como esperado, os cenários onde simula-se o aumento de capacidade das vias com os tempos semafóricos otimizados apresentam resultados superiores aos apresentados pelos cenários compostos por apenas 2 faixas de tráfego.

De forma geral, maiores volumes veiculares necessitam ciclos maiores para aumentar a capacidade e evitar congestionamentos. No entanto, para horários fora de pico, aumentaria-se os atrasos por não utilizar de forma otimizada a fase de verde da interseção (46). Para o caso em estudo, os resultados mostram que o tempo de ciclo que apresenta o menor atraso é o de 45 segundos. No entanto, este resultado deixou de ser uma opção para gerenciamento destas vias visto que, existe o aumento contínuo da frota veicular e busca-se tornar o transporte público coletivo mais atrativo para garantir a viabilidade futura destas vias. Observa-se ainda que os resultados obtidos nos cenários 5 e 7, cujo tempo de ciclo são 60 e 75 segundos respectivamente e os tempos semafóricos otimizados, confirmam a necessidade de controle semafórico e as vantagens da implantação de faixas de rolagem exclusivas para ônibus.

De acordo com (47), o índice de desempenho é o critério adotado para julgar a medida de eficiência de uma determinada política de semáforos, e é composto pela soma das seguintes parcelas: Atraso uniforme + Atraso aleatório. Assim, com base na Figura 4.7, observa-se que nos cenários onde foi simulada a influência da capacidade viária, o índice de desempenho foi superior independente do tempo de ciclo aplicado.

Observa-se ainda que a partir da simples otimização dos planos semafóricos mantendo-se a faixa de estacionamento (Cenário 2), é possível obter um desempenho 10% superior. No entanto, levando-se em consideração a crescente demanda veicular, esta alternativa demandaria ações adicionais a curto prazo.

Serão apresentados os diagramas Espaço x Tempo da Rua Benjamin Constant (Trecho 1), por ser o principal eixo de ligação ao terminal central de transportes coletivo, e da Av. Prof. João Candido por já ter sido implantado o corredor exclusivo.

Para esta análise, foram gerados os gráficos, como exemplo a Figura 4.8 onde as retas inclinadas representam as trajetórias dos veículos presentes entre as interseções. O fluxo só é representado durante a fase de tempo verde.

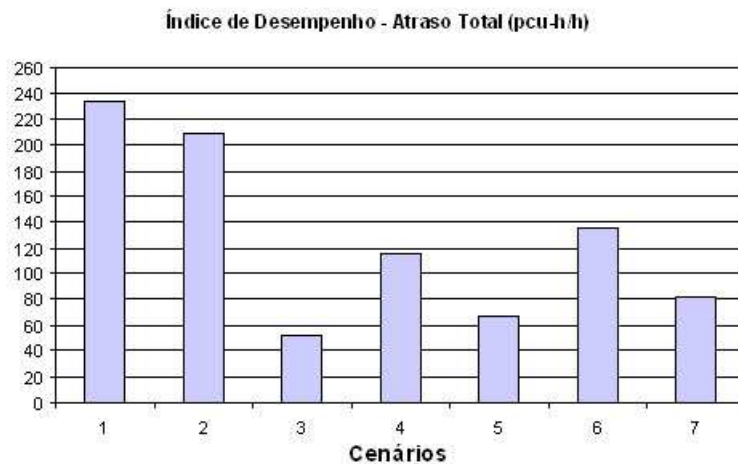


Figura 4.7 – Índice de Desempenho - Atraso Total (pcu-h/h)

A Figura 4.8, ilustra o comportamento da "onda verde" no Cenário 1 (anterior a março de 2010), onde é possível observar um padrão similar de retenção de tráfego pela fase vermelha ao final de cada ciclo em todos os cruzamentos. Observa-se ainda uma situação de bloqueio total na interseção com a Rua Minas Gerais (5640). Este comportamento, além de esperado, reproduz a situação real do tráfego na Rua Benjamin Constant antes na implantação de um valor de ciclo maior.

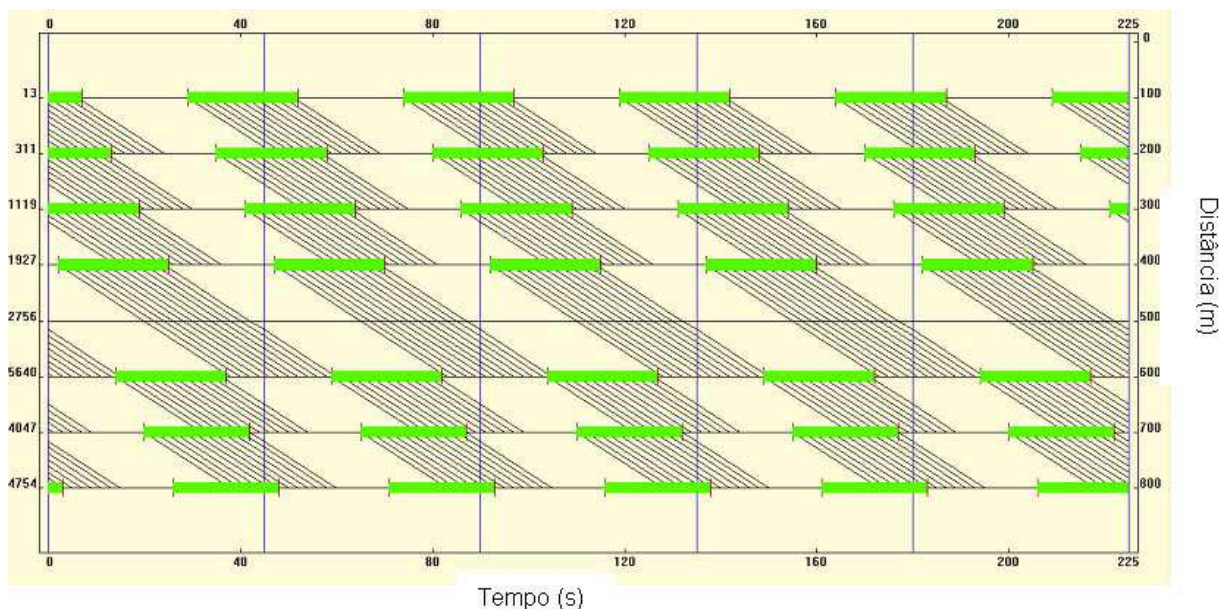


Figura 4.8 – Diagrama Espaço x Tempo - Cenário Original.

A Figura 4.9, apresenta o comportamento do tráfego com os tempos semafóricos e defasagens otimizadas. Pode-se verificar que a coordenação é favorável para ambos automóveis e ônibus, em praticamente todas as interseções, sendo que apenas alguns veículos ficam retidos na fase vermelha ao final do tempo de ciclo das 3 últimas interseções.

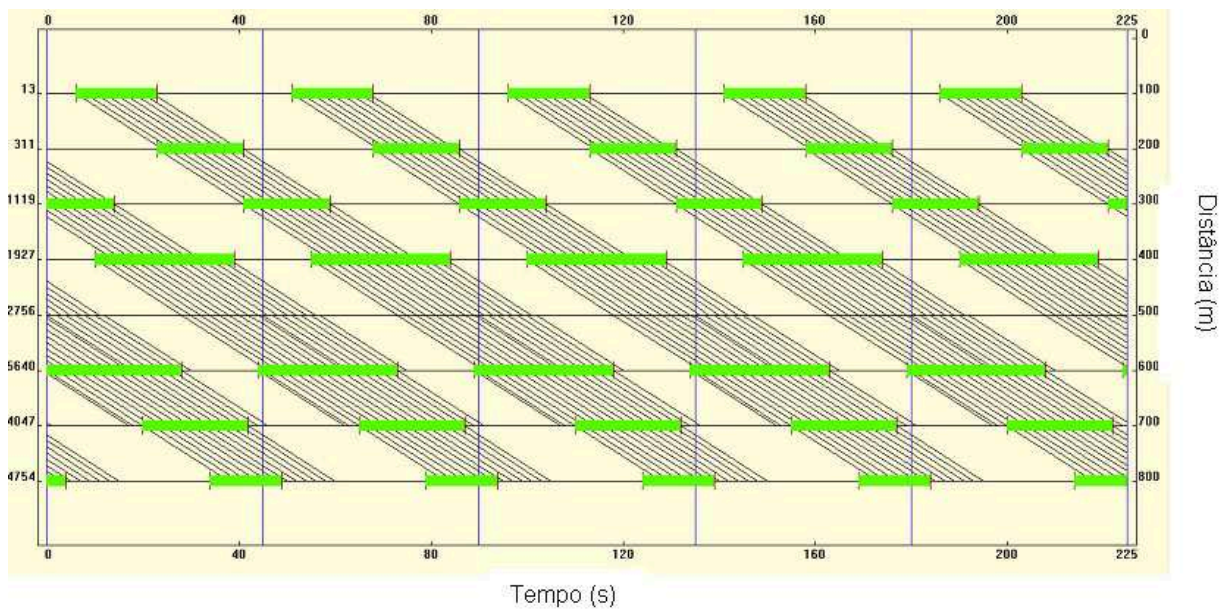


Figura 4.9 – Diagrama Espaço x Tempo - Otimização do cenário original.

A criação de uma faixa adicional de tráfego de ônibus e taxis com passageiros, Figura 4.10, proporciona a ocorrência de um padrão praticamente similar de "onda verde" para as 2 faixas de tráfego geral, onde obteve-se uma coordenação semafórica desfavorável apenas para os veículos que param na fase vermelha da interseção com a Rua Mato Grosso (4647).

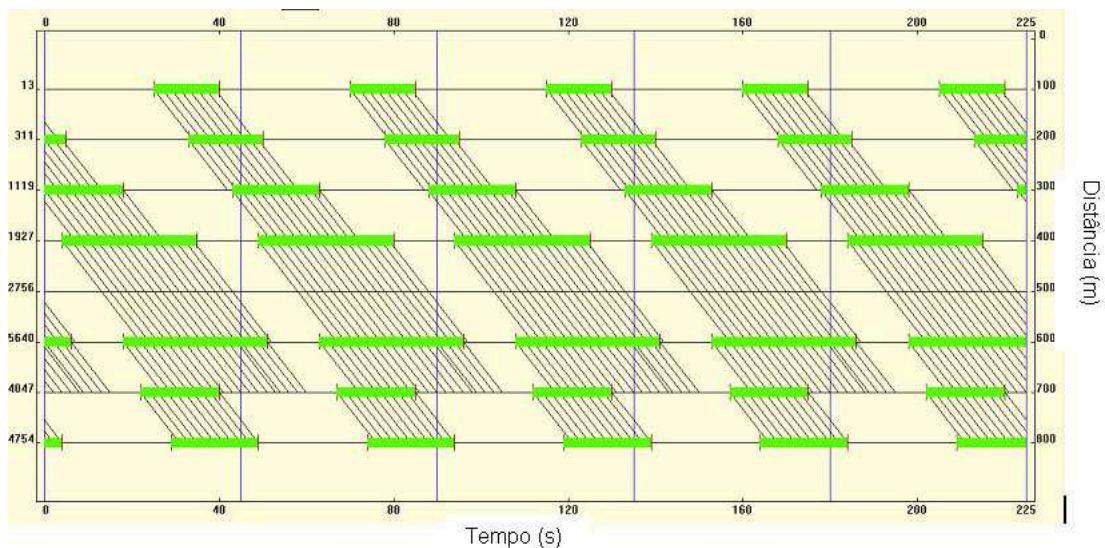


Figura 4.10 – Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 3 - Ampliação e otimização das faixas de tráfego - tempo de ciclo 45 segundos.

A Figura 4.11 apresenta resultados exclusivos da faixa de ônibus para o Cenário 3, com os mesmos tempos calculados da Figura anterior. Observa-se que este cenário proporciona um plano de sincronismo favorável aos automóveis, porém para o fluxo de ônibus ocorreu uma desvantagem, ficando veículos retidos em praticamente todas as interseções. Os níveis mais

críticos de retenção na fase vermelha podem ser observados nas 3 últimas interseções.

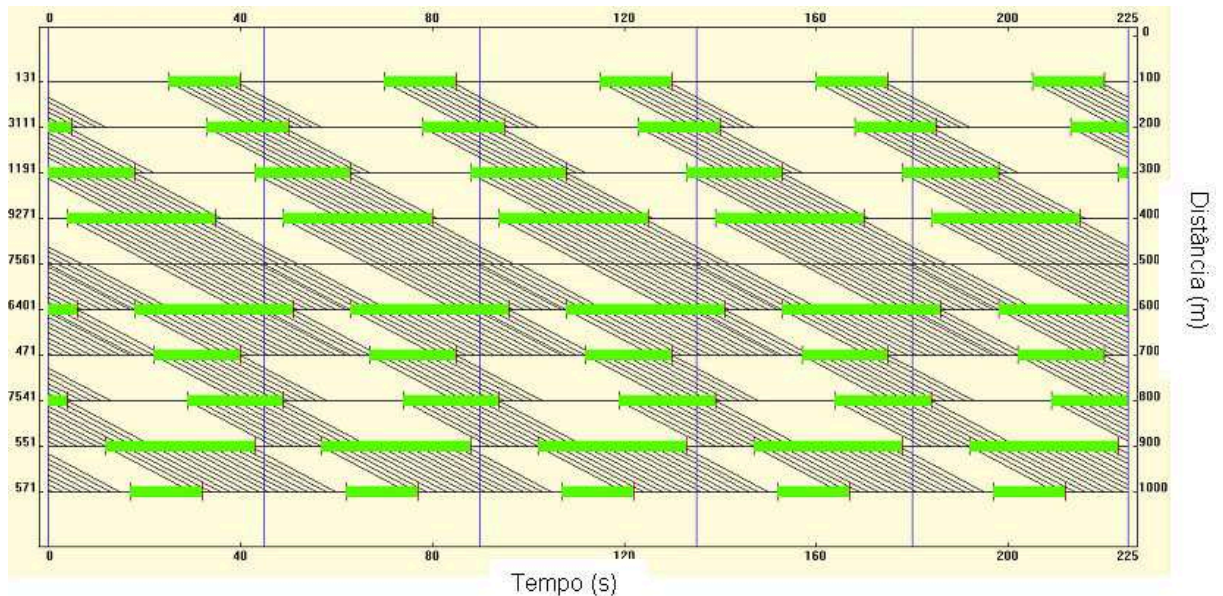


Figura 4.11 – Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 3 - Resultados da otimização na faixa de ônibus.

A Figura 4.12, apresenta o comportamento do tráfego para o Cenário 4, ou seja, um ciclo de 60 s, sem o aumento da capacidade do link. A importância de apresentar esta situação é na verificação do ganho obtido após transformação da faixa de estacionamento em faixa de rolagem e criação da faixa exclusiva para ônibus, Figura 4.13. Este ganho também pode ser verificado na Tabela 4.4.

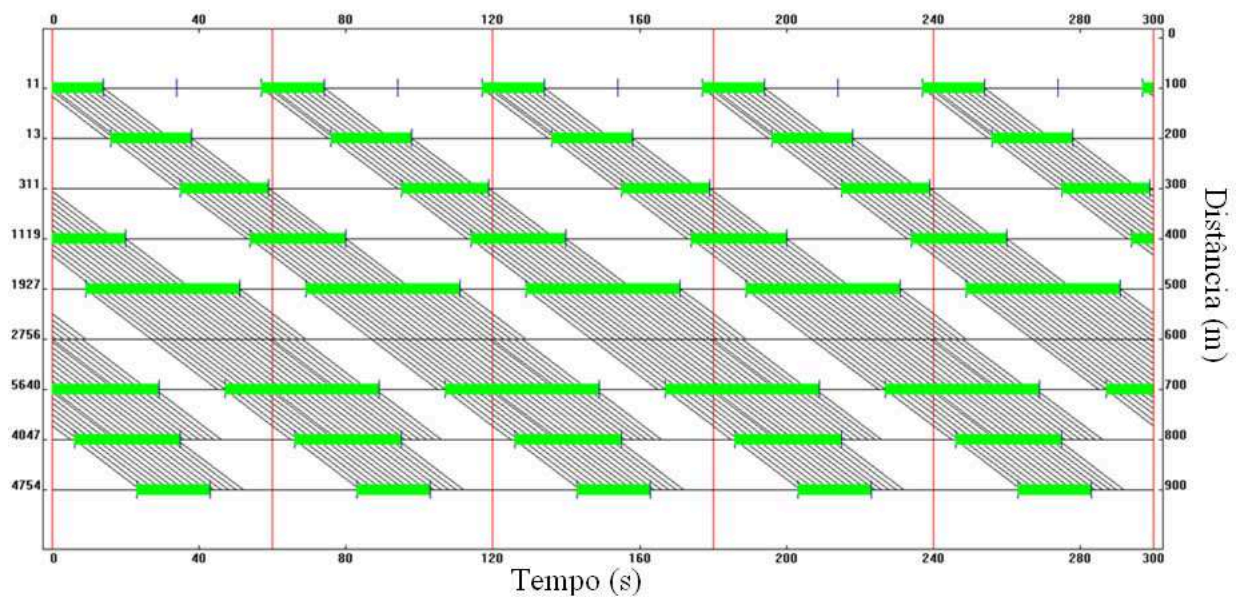


Figura 4.12 – Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 4 - Ciclo 60 s, com duas faixas de rolagem.

Foram apresentados estes resultados das Figuras 4.12 e 4.13, pois é a situação implantada

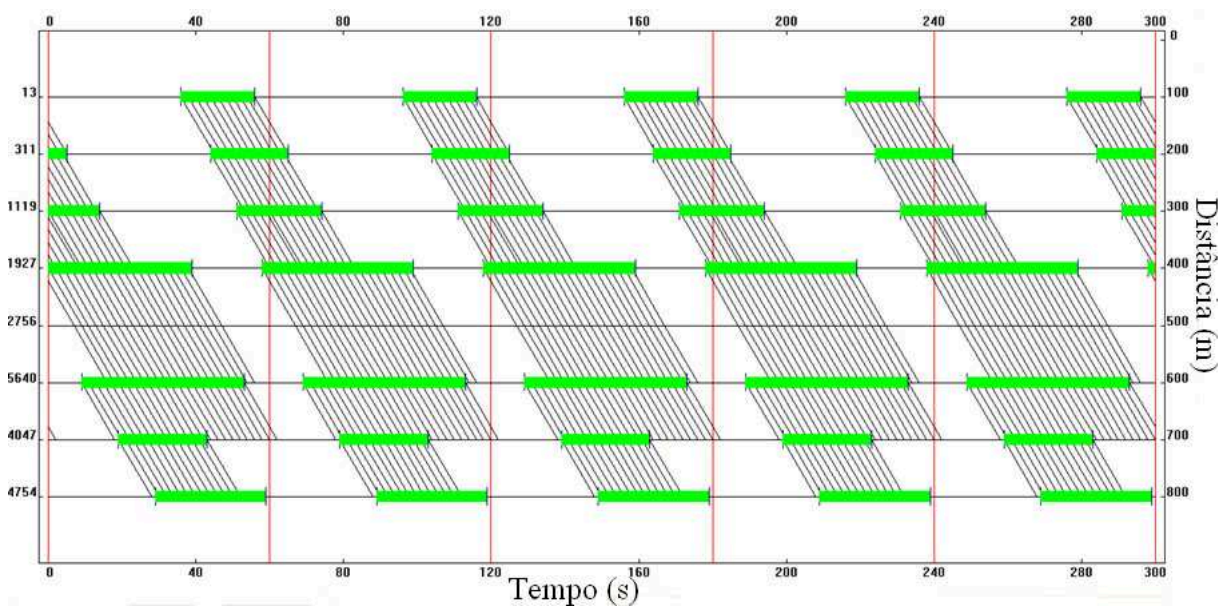


Figura 4.13 – Diagrama Espaço x Tempo - Cenário 5 - Ciclo de 60 s, com três faixas de rolagem.

na Rua Benjamin Constant hoje. Foi implementado o ciclo de 60 s, no entanto, os tempos de verde, de amarelo e a defasagem foi implantada de forma empírica.

Alguns dos benefícios que podem ser obtidos a partir da otimização dos planos de sincronismo destacam-se:

- Significativa redução dos tempos de viagem;
- Melhora na qualidade de vida dos usuários (fator stress);
- Antecipação de melhorias na acomodação de um provável aumento no volume de tráfego futuro;
- Efetivo aumento de desempenho dos planos semafóricos atuais.

4.5 Diretrizes para um planejamento viário

De acordo com (48), faz-se necessário que a administração pública entenda a questão estratégica da mobilidade através de meios de transportes eficientes para garantir melhora na qualidade de vida e conseqüente melhora na produtividade e principalmente na competitividade econômica das cidades.

Desta forma, entende-se que a medida tomada pela administração pública de Londrina trata-se de um primeiro passo, no entanto, deve-se desde já avaliar a adoção de corredores exclusivos para o transporte público coletivo para todas as vias que apresentam volumes

significativos de ônibus em circulação. Também, a necessidade de otimizar, através de uma ferramenta de cálculo validada, os tempos semafóricos das aproximações de forma dinâmica, ou seja, para as diferentes demandas veiculares ao longo do dia, e dias da semana. Faz-se necessário também, um estudo mais aprofundado quanto a priorização dos ônibus de forma ativa ou passiva, ou seja, criar-se uma "onda verde" para os corredores de exclusivos em detrimento às faixas de rolagem para veículos particulares.

Espera-se que tal sistema de gerenciamento da malha viária urbana resulte políticas sustentáveis que integrem as mais diversas formas de transportes, direcionando para uma expansão e ocupação do solo racional, e ecologicamente sustentável, e principalmente, que promova melhora a inclusão e conseqüente melhora na qualidade de vida dos seus usuários. A adoção de medidas que influenciam a qualidade de vida do indivíduo impactam diretamente na sua produtividade, como conseqüência, a capacidade econômica da cidade tende a aumentar.

4.6 Conclusões

Os resultados obtidos através das simulações efetuadas indicam que a melhor opção de projeto para proporcionar uma melhor circulação nesta sub-rede trata-se do cenário 3, que corresponde a otimização das 2 faixas de fluxo geral de veículos com adição de 1 faixa exclusiva para ônibus e taxis com passageiros. No entanto, é importante considerar que com o grande crescimento de demanda que vem sendo verificado, um aumento no tempo de ciclo será inevitável.

Como em qualquer simulação, é importante ressaltar que algumas informações, como coeficiente de dispersão, ou localização e tempo de paradas de ônibus não foram aplicadas neste trabalho. No entanto, o resultado é um forte indicativo na necessidade da implantação de otimização semafórica na cidade de Londrina, principalmente porque o aumento de capacidade não será realizado em todas as vias da região central. Isto não ocorrerá devido às limitações físicas, e problemas de congestionamentos crescente também em outras vias da malha central da cidade.

Neste sentido, deve-se conduzir um planejamento estratégico que atenda ao crescente aumento de demanda de usuários de transporte coletivo e automóveis de forma efetiva e sustentável.

4.7 Agradecimentos

O autor deste trabalho agradece ao IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina - Diretoria de Trânsito Sistema Viário) e ao CMTU (Companhia Municipal de

Transporte Urbano - Londrina) pelo suporte e disponibilização das informações utilizadas nesta pesquisa.

Referências

- [37] CARDOSO, C. E. P. *Análise do Transporte Coletivo Urbano sob a Ótica dos Riscos e Carências Sociais*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2007.
- [38] ENDO, W. *Algoritmo de Controle de Tráfego Urbano Baseado em Otimização de Ciclo, Defasagem e Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, Dezembro 2006.
- [39] OZELIM, L.; JACQUES, M. ESTUDO DA OPERAÇÃO DO TRÁFEGO EM VIA ARTERIAL URBANA CONTROLADA POR SEMÁFOROS COM O USO DE SIMULADOR. *Revista de Pesquisa Aplicada à Engenharia*, v. 1, n. 1, 2008.
- [40] CRABTREE, M.; VINCENT, R.; HARRISON, S. *Transyt/10 user guide. Application guide-Transport Reseach Laboratory*, Transport Research Laboratory, 1996.
- [41] POYARES, C. *Critérios para análise dos efeitos de políticas de restrição ao uso de automóveis em áreas centrais*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Engenharia em Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2000.
- [42] DALTO, E. J. *Modelo Computacional para Simulação Microscópica do Tráfego Veicular em Interseções SemafORIZADAS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.
- [43] ROBERTSON, D. I. *TRANSYT: A traffic network study tool*. In: ROAD RESEARCH LABORATORY. Crowthorne, England, 1968.
- [44] LTDA., V. P. *Avaliação do Fluxo de Veículos - Rua Sergipe e Rua Benjamin Constant*. Londrina - PR, 2009.
- [45] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in search optimization and machine learning*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.
- [46] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). *Manual de Semáforos*. Segunda edição. Brasília, Brasil, 1984.
- [47] BELLONI, A. J. *Otimização de semáforos de tempos fixos: Redes de tráfego não saturadas, mas com capacidade dependente das filas de veículos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Setembro 1983.

- [48] BUSTAMANTE, R. *Transporte Público Coletivo em Bogotá, do Sistema Tradicional ao Transmilênio: Um Mercado em Transição*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007.

Conclusão

O contexto avaliado neste trabalho representa uma situação muito comum nas médias e grandes cidades brasileiras, na qual importantes corredores arteriais operam com planos semaforicos únicos e não coordenados, e deseja-se avaliar qual a melhor opção para aumentar seu desempenho operacional, reduzindo congestionamentos.

As simulações efetuadas com auxílio da ferramenta TRANSYT/10 confirmam que a remoção da faixa de estacionamento para implantação de corredores exclusivos de ônibus irá aumentar o desempenho operacional beneficiando ambos os usuários desta sub-rede. No entanto, os resultados obtidos neste estudo não podem ser generalizados, pois além de representarem somente uma área específica da malha viária central da cidade de Londrina, não trouxeram conclusões definitivas sobre os parâmetros mais adequados para as vias estudadas, indicando apenas uma tendência.

Mesmo com o aumento da capacidade das vias, a otimização semaforica é necessária, pois a demanda veicular é crescente e no futuro a falta da otimização acarretará em novos congestionamentos.

5.1 Recomendações e propostas para trabalhos futuros

As seguintes recomendações são necessárias:

- Revisão e atualização dos tempos semaforicos de forma a beneficiar todo o tráfego;
- Realização de novos estudos avaliando-se cenários para os diversos volumes de tráfego (demandas) ao longo do dia e dias da semana;
- Avaliação dos benefícios econômicos e ambientais obtidos a partir da otimização dos tempos semaforicos e conseqüente redução dos tempos de viagem;

- Como estes corredores também apresentam uma grande demanda por transporte público, pode-se também avaliar a operação semafórica com prioridade para ônibus;
- Avaliação de outras estratégias: algoritmos de controle semafórico: ATEFI e ATESA, microsimulador: SUMO;
- Ajuste de parâmetros como fator de dispersão e fluxo de saturação levantados a partir de dados reais da malha viária de Londrina;
- Como estes corredores também apresentam uma grande demanda por transporte coletivo, pode-se também avaliar a operação semafórica com prioridade para ônibus;
- Avaliação de outras estratégias de controle (tabela horária, seleção dinâmica de planos de tempos fixos, geração dinâmica) assim como a utilização de parâmetros ajustados à realidade brasileira para as mais diversas vias de forma a estabelecer um critério seguro para a escolha da melhor configuração semafórica para a situação estudada;
- Estender a avaliação para toda a malha viária central da cidade de Londrina.