



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Marcelo Lacortt

**Modelagem Matemática para Otimização do Tráfego Urbano
Semaforizado**

Passo Fundo

2011

Marcelo Lacortt

**Modelagem Matemática para Otimização do Tráfego Urbano
Semaforizado**

Orientador: Moacir Kripka, Dr.

Co-orientadora: Rosana M. L. Kripka, Ms.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Passo Fundo

2011

Marcelo Lacortt

**Modelagem Matemática para Otimização do Tráfego Urbano
Semaforizado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infraestrutura e Meio Ambiente.

Data de aprovação: Passo Fundo, 30 de setembro de 2011.

Os membros componentes da banca examinadora abaixo aprovam a dissertação.

Prof. Dr. Moacir Kripka
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

Prof. Ms. Rosana Maria Luvezute Kripka
Universidade de Passo Fundo
Coorientadora

Prof. Dr. Gray Farias Moita
CEFET/MG

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Universidade de Passo Fundo

Prof. Dra. Rosa Maria Locatelli Kalil
Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2011

Agradeço...

Primeiramente, a Deus, por ter me dado a vida e força para enfrentar todos os meus desafios.

Aos meus orientadores, professor Moacir Kripka e professora Rosana M. L. Kripka, pela orientação, incentivo e direcionamento da minha pesquisa.

A minha esposa e família, por terem me incentivado e apoiado nas horas precisas.

A Engenheira Civil, da Prefeitura Municipal de Passo Fundo, Gislaine Praetorius Mello Alves, por ter fornecido dados e suportes técnicos do trânsito de Passo Fundo.

Aos estagiários, do curso da Engenharia Civil da Universidade de Passo Fundo, Adriana Grando de Oliveira, Juliana Paludo e Leonardo Triches, por terem me ajudado na coleta de dados do trânsito da cidade de Passo Fundo.

Aos meus colegas e professores que me acompanharam durante esta jornada, propiciando a minha evolução intelectual e pessoal.

RESUMO

Em razão do crescente aumento da frota veicular na maioria das cidades, os sistemas de trânsito presentes nas vias destas acabam não comportando o grande número de veículos existente, surgindo os inevitáveis congestionamentos e, por consequência, diversos problemas relacionados a esses. Considerando a importância do emprego de técnicas matemáticas de otimização na solução de problemas reais, o presente trabalho trata da investigação e proposta de emprego dessas técnicas na programação semafórica, com o objetivo de encontrar tempos semafóricos otimizados, que reduzam de modo considerável o tempo de percurso veicular em cidades de médio e grande porte. No trabalho, apresentam-se dois modelos de otimização, os quais, implementados e considerando dados do trânsito da região que se pretende otimizar, possibilitam fornecer de forma automatizada tempos de verde que visam minimizar o tempo de percurso veicular. Também são apresentados os resultados computacionais obtidos na investigação desses modelos em dois exemplos teóricos, um baseado em dados disponibilizados na literatura e outro baseado em dados coletados relativos ao trânsito de uma região central da cidade de Passo Fundo/RS. No primeiro exemplo foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos pelos modelos e os fornecidos pelo *software* Transyt 7F, ao passo que no segundo exemplo comparam-se, através de indicadores teóricos, o desempenho do trânsito veicular, pertencentes as vias antes e após o processo de otimização. Os resultados foram positivos em ambos os exemplos, dando respaldo a um possível emprego dos modelos em situação real.

Palavras-chave: Trânsito. Automatização. Otimização. Programação Semafórica.

ABSTRACT

Due to the growing increase of the vehicle fleet in most cities, the traffic systems present in their streets end up not to permit the large number of existing vehicles, emerging inevitable traffic jams and, consequently, several problems related to them. Considering the importance of the use of mathematical optimization techniques to solve real problems, this paper deals with the investigation and proposal of use of these techniques in programming traffic lights in order to find optimal times, which considerably reduce the time of vehicular travel in cities of medium and large size. This work presents two optimization models which, implemented and considering the region traffic data intended to optimize, enable to provide an automated way of green light timing that aim to minimize the time of vehicular travel. Also, it presents the computational results obtained in the investigation of these models in two theoretical examples, one based on data available in the literature and the other based on collected data related to the traffic of a central region of the city of Passo Fundo, RS. In the first example, a comparison was made between the results obtained by the models and those provided by the Transyt 7F software; whereas in the second example, the performance of vehicular traffic belonging to the streets before and after the process of optimization are compared through theoretical index. The results were positive in both instances, giving support to a possible use of the models in a real situation.

Keywords: Traffic. Automation. Optimization. Traffic Light Schedule.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de uma modelagem.....	22
Figura 2: Esquema de uma modelagem.....	24
Figura 3: Ótimo local e global.....	31
Figura 4: Algoritmo <i>Simulated Annealing</i>	35
Figura 5: Diagrama de estágios	38
Figura 6: Diagrama de tempos	56
Figura 7: Rede hipotética.....	60
Figura 8: Mapa da região selecionada para a simulação dos modelos	70
Figura 9: Mapa com os comprimentos das ruas da região que foi otimizada	72
Figura 10: Gráfico dos graus de saturação, com tempos semafóricos atuais e otimizados.	80
Figura 11: Representação gráfica dos atrasos uniformes, com os tempos semafóricos atuais e otimizados (em segundos).	81
Figura 12: Representação gráfica do número de veículos retidos com tempos semafóricos atuais e otimizados	82
Figura 13: Graus de saturação da avenida Brasil com os diferentes tempos de ciclo	84
Figura 14: Graus de saturação das vias transversais com os diferentes tempos de ciclos	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicadores de capacidade e nível de serviço.....	48
Tabela 2: Dados otimizados pelo Transyt 7F	61
Tabela3: Comparação entre resultados obtidos pelo Transyt 7F em relação aos obtidos pelo Modelo 1, com variações de K , de 10 em 10 unidades.....	62
Tabela 4: Graus de saturação proporcionados pelos diferentes valores de K	63
Tabela 5: Atraso Uniforme (AU), em segundos, com variações de 10 em 10 unidades, no valor de K	65
Tabela 6: Tempos semafóricos, em segundos, otimizados pelo Modelo 2	66
Tabela 7: Tempos semafóricos, em segundos, e número de iterações, com diferentes valores do fator de redução da temperatura (α).....	68
Tabela 8: Fluxo de saturação e fluxo veicular, em veículos por hora de tempo verde, nas vias da rede selecionada para a otimização.	71
Tabela 9: Comprimento das vias, em metros, do percurso no qual foi realizada a otimização.....	72
Tabela 10: Tempos semafóricos atuais, em segundos, do percurso otimizado	73
Tabela 11: Amostra coletada em campo, de veículos em espera e de veículos que passam a aproximação	74
Tabela 12: Média de veículos em espera e que passam a aproximação, por ciclo.....	75

Tabela 13: Fluxo de saturação, veículos por segundo	75
Tabela 14: Graus de saturação (X), adimensional	76
Tabela 15: Atraso uniforme (AU), em segundos, por cruzamento.....	76
Tabela 16: Número de veículos retidos no cruzamento, após o tempo de verde	76
Tabela 17: Tempos semafóricos, em segundos, otimizados pelo Modelo1	77
Tabela 18: Tempos semafórico, em segundos, atuais e otimizados	78
Tabela 19: Graus de saturação (X)	79
Tabela 20: Graus de saturação (X), com tempos semafóricos atuais e otimizados.....	79
Tabela 21: Atraso uniforme (AU), em segundos, por cruzamento.....	80
Tabela 22: Atraso uniforme (AU) por cruzamento, em segundos, com tempos semafóricos atuais e otimizados	80
Tabela 23: Média de veículos em espera e veículos que passam a aproximação, por ciclo	81
Tabela 24: Número de veículos retidos no cruzamento, após o tempo de verde	82
Tabela 25: Número de veículos retidos, com temporizações atuais e otimizadas, ao término de tempo de verde.....	82
Tabela 26: Tempos semafórico, em segundos, graus de saturação por fase (X) e atraso uniforme por cruzamento (AU), em segundos, com diferentes tempos de ciclo.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS

ATEFI: Algoritmo em tempo fixo

Av: Avenida

CET: Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo

CO: Monóxido de carbono

CTAFOR: Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza

fx: Faixa da via

htv: Hora de tempo verde

ID: Índice de desempenho

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

pass: passageiro

PL: Programação Linear

PNL: Programação Não Linear

Scoot: *Split, Cycle and Offset Optimisation Technique*

SA: *Simulated Annealing*

Siri: Simulador de Redes de Semáforos

Transyt : *Traffic Network Study Tool*

Ucp: Unidades de carros de passeio

v/htv: veículos por hora de tempo verde

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p : Capacidade de uma aproximação sinalizada.

S : Fluxo de saturação.

g_{ef} : Tempo de verde efetivo.

C : Tempo ou tamanho de ciclo em segundos.

g : Tempo de verde normal.

t_a : Tempo de amarelo.

I : Tempo perdido por fase.

T_p : Tempo perdido por ciclo.

n : Número de fases.

L : Largura da aproximação em metros.

y : Taxa de ocupação.

q : Fluxo de veículos ou demanda.

X : Grau de saturação.

C_o : Tamanho de ciclo ótimo.

y_{c_i} : Taxas de ocupação crítica.

d_m : Atraso médio total sofrido por um veículo.

d_{mr} : Atraso médio total sofrido por um veículo estimado pela forma reduzida.

d_T : Atraso médio total sofrido por um veículo utilizado pelo *software* Transyt 7F.

λ_i : Relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo $\left(\frac{g_{ef_i}}{C} \right)$.

λ_{n_i} : Relação entre o tempo de verde norma e o tempo de ciclo $\left(\frac{g_i}{C} \right)$.

X_i : Grau de saturação da aproximação i .

q_i : Fluxo veicular da aproximação i .

A_i : Chegada acumulada no instante t .

D_i : Escoamento acumulado no instante t .

A_c : Total de chegadas durante o ciclo.

Δt : Comprimento do intervalo de tempo $\left(\frac{C}{n}\right)$.

n_t : Número de unidades de tempo em que o ciclo é subdividido.

D : Atraso médio total (s/veículo).

V_i : Volume para o movimento i (vph).

C_{mi} : Capacidade do movimento i (ucp/h).

T : Período de análise (h) para um período de 15min ($T = 0,25$).

p : Proporção de veículos detidos (%).

h : Proporção de veículos detidos (%).

y : Relação entre a demanda de tráfego e o fluxo de saturação $\left(\frac{q}{S}\right)$.

T_d : Tempo de deslocamento.

d : Distância da via.

V_p : Velocidade esperada de deslocamento do fluxo na aproximação.

A_v : Atraso veicular.

I_i : Tempo perdido por fase na aproximação i .

t_{ai} : Tempo de amarelo na aproximação i .

ID : Índice de Desempenho da rede.

n_l : número de *links* da rede.

A_l : Atraso do *link* l da rede.

Kp : Peso da parada.

NP_l : Número de paradas do *link* l da rede.

IP : Índice de *Performance*.

d_i : Atraso médio uniforme do *link* i (s).

d'_i : Atraso médio aleatório do *link* i (s).

K : Fator de penalidade de parada.

S_i : Número médio de paradas no *link* i .

a_t : Chegadas de veículos no intervalo de tempo.

t_r : Instante de início do período vermelho do *link* i .

t_0 : Instante no período vermelho do *link* i , no qual a fila se torna nula.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Estrutura do trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Modelagem matemática	21
2.2 Otimização	26
2.2.1 Modelos de otimização	26
2.2.2 Programação linear	28
2.2.3 Programação não linear	29
2.2.4 Problemas de otimização combinatória	30
2.2.5 Resolução de problemas de otimização	31
2.2.6 Simulated Annealing	33
2.3 Engenharia de tráfego	36
2.3.1 Regulagem de semáforos isolados	39
2.3.2 Alguns softwares de programação de semáforos	48
2.3.2.1 Siri	48
2.3.2.2 Atefi	50
2.3.2.3 Scoot	50
2.3.2.4 Transyt	51
3 MODELOS PARA OTIMIZAÇÃO DO TRÁFEGO	54
3.1 Modelo 1	54
3.2 Modelo 2	57
3.3 Implementação computacional dos modelos	58
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	60
4.1 Estudo Teórico 1	60
4.1.2 Estudo para verificar as influências da variação nos parâmetros do <i>Simulated Annealing</i> para o Modelo 1	66

4.2 Estudo Teórico 2.....	69
4.2.1 Critérios de avaliação de resultados	73
4.2.2 Análise das influências no tempo de ciclo para o Estudo Teórico 2	83
5 CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O transporte veicular é um artifício indispensável para a mobilidade humana, do qual a maioria da população mundial usufrui para se deslocar de forma rápida e segura. Segundo pesquisa divulgada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2011), a rapidez na locomoção é a característica mais importante para classificar um bom meio de transporte. No entanto, conforme a mesma fonte, a média brasileira de pessoas que enfrentam congestionamento mais de uma vez por dia no Brasil é de 20,5%, chegando na região Sudeste a 21,6% e na região Sul a 21,9%.

As crescentes facilidades em adquirir um meio de transporte próprio, aliadas ao desenvolvimento econômico, ao aumento populacional e a falta de um sistema de transporte coletivo que seja suficiente e de qualidade, constituem-se em fatores decisórios para o acúmulo de veículos nos centros urbanos. Em razão do aumento contínuo da frota veicular, os sistemas de trânsito atuais da maioria das cidades acabam não comportando o grande número de veículos existente. Por consequência, surgem os inevitáveis congestionamentos e, com esses, vários problemas à sociedade, como alto nível de estresse, poluição, acidentes e prejuízos econômicos, sendo este último decorrente do alto consumo de combustível e desperdício de tempo.

Desse modo, o problema referente ao trânsito é uma das principais preocupações de governantes, dos profissionais da área de planejamento urbano e da população em geral, tendo em vista que todos que usufruem de alguma maneira do sistema viário urbano passam a ser afetados por tal situação.

Atualmente, existem vários dispositivos eletrônicos com a finalidade de organizar o trânsito para que flua de forma rápida e segura, dentre os quais se destacam os semáforos, pois são os dispositivos de controle de tráfego que comportam os tempos semaforicos deste estudo. Porém, tal dispositivo traz dúvidas quanto a sua total eficácia, visto que possui flexibilidade quanto aos seus tempos de programação e, no caso de ser programado de forma incorreta, pode não cumprir sua função com o máximo desempenho, prejudicando, assim, o tempo de percurso dos veículos.

De fato, o processo de tomada de decisão em relação à programação e à localização deste dispositivo de regulação de trânsito é geralmente realizado de forma empírica, ou seja, baseado meramente na experiência dos profissionais que atuam na área.

O problema de controle de trânsito em vias urbanas é complexo, em virtude, principalmente, da aleatoriedade dos padrões de comportamento do trânsito, que são influenciados por diversos fatores externos, tais como condições climáticas, leis de trânsito, mudanças físicas locais como uma nova escola, acidentes, feriados, férias, padrões culturais, e assim por diante.

Visando minimizar os problemas de tráfego nas cidades de médio e grande porte, diversos softwares e algoritmos têm sido desenvolvidos, tais como o sistema Siri (VILANOVA, 2004), Atefi (PIAI e CERVANTES, 2009), Scoot e Transyt (ROBERTSON, 1986), sendo este último o mais citado na literatura. No entanto, esses *softwares* são de alto custo para aquisição e necessitam de treinamento para sua utilização. Dessa forma, diante da falta de recursos e de mão de obra especializada por parte da maioria das prefeituras brasileiras, os problemas referentes ao trânsito das cidades brasileiras não têm sido comumente estudados com o emprego dos sistemas citados.

Estudos e pesquisas realizados na área do trânsito podem apresentar métodos e sugestões para amenizar, ou até mesmo solucionar, problemas ocasionados pela grande massa veicular que circula nas cidades de médio e grande porte. Nesse sentido, diversos trabalhos disponíveis na literatura apresentam os benefícios que técnicas matemáticas de otimização podem proporcionar a problemas referentes ao controle de trânsito, assim como avaliam as diferentes técnicas existentes, dentre os quais se destacam os de Vilanova (2005), Villalobos (2002), Reis (2002) e Loureiro, Gomes e Pires (2002).

Vilanova (2005), autor do programa de computador Siri - Simulador de Redes de Semáforos, desenvolvido na CET de São Paulo (Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo), descreve as vantagens da elaboração de um *software* para programação semafórica. Segundo o autor, o Siri, por ser elaborado no Brasil, destaca-se em relação aos *softwares* estrangeiros ao levar em conta características peculiares do trânsito brasileiro, as quais são o tamanho físico das caixas entre dois semáforos, botoeiras de pedestres chamando estágios específicos em cruzamentos, ciclos duplos assimétricos e tempos de verde de segurança configurados por grupo semafórico, não por estágio.

A principal função do Siri é calcular os melhores tempos de verde, defasagens e tempo de ciclo, objetivando que os veículos venham a ter o menor tempo de espera e o

menor número de paradas possível. Assim, o algoritmo deve respeitar determinadas condições impostas pelo usuário, tais como tempo de ciclo máximo, os tempos de verde de segurança e tempos de entreverdes.

Villalobos (2002) realizou estudo em uma interseção na cidade de Florianópolis, SC/BR, tendo como objetivo otimizar o tempo de ciclo e os períodos de verde de cada fase, de forma a minimizar o atraso e a poluição, esta última medida em concentrações de monóxido de carbono (CO). Para tanto foi elaborada uma função objetivo que possibilitou relacionar o atraso e a poluição. Para a obtenção dos referidos valores ótimos foram utilizados os métodos de Webster, propostos em 1958, obtendo desta forma tempos que minimizavam o atraso e a poluição. (VILLALOBOS, 2002).

Reis (2002) demonstrou vantagens com uso da otimização no trânsito veicular através da otimização dos fluxos de veículos, utilizando o programa Transyt 7F. Seu estudo foi aplicado na cidade de Uberlândia, MG/BR, onde investigou sobre as implicações na variação do fluxo de saturação de uma via, na otimização do fluxo de veículos, em um corredor de transporte. O fluxo de saturação de uma interseção é definido como o fluxo que seria obtido se houvesse uma fila de veículos na aproximação e a ela fossem dados 100% de tempo de verde do cruzamento (escoamento ininterrupto), expresso em unidade de veículos por hora de tempo de verde (veículos/htv). (BRASIL, 1984, p. 62).

Para se obter os resultados da pesquisa, Reis considerou simulações com variações de até $\pm 7,5\%$ no fluxo de saturação, onde buscou analisar o que ocorria com os parâmetros considerados como indicadores de desempenho, tais como: velocidade média, relação volume/capacidade, índice de desempenho, atraso médio e consumo de combustível, dentre outros, com a finalidade de se poder fazer uso de uma programação que proporcionasse melhores resultados para tais indicadores.

Loureiro, Gomes e Pires (2002) tiveram como objetivo principal em seu trabalho avaliar o desempenho operacional das interseções controladas pelo Sistema Centralizado de Controle do Tráfego de Fortaleza (CTAFOR), comparando o desempenho da operação com planos de tempo fixo dimensionados pelo Transyt *versus* o controle adaptativo, em tempo real, do sistema Scoot. Para comparar tais estratégias, foram escolhidas seis interseções semaforizadas, representativas das situações mais críticas na área controlada pelo CTAFOR, classificadas de acordo com o tipo de operação (isolada ou coordenada) e o grau de saturação (médio ou alto).

Na busca de obter parâmetros para avaliar se o melhor desempenho operacional da via é por meio da programação semafórica obtida pelo Transyt (em tempo fixo) ou pelo Scoot (em tempo real), foram coletados dados do trânsito que quantificassem o tempo de atraso para cada estratégia. Para obter tais medidas, foram feitas gravações em vídeo das imagens captadas pelas câmeras do subsistema do CTAFOR. (LOUREIRO; GOMES; PIRES, 2002).

No estudo desses autores, os níveis de atraso total médio por veículo, medidos em campo para as aproximações das interseções classificadas como de grau de saturação “médio”, variaram no intervalo entre 10 e 55 segundos; já para as interseções com “altos” graus de saturação, os atrasos variaram entre 25 e 145 segundos. Nesta pesquisa, os resultados apontaram para uma maior eficácia do tempo real, calculado pelo Scoot, na redução dos atrasos médios, em aproximações operando próximas ao limiar da capacidade.

Diante do contexto, estudos acadêmicos podem proporcionar inovações sobre técnicas de otimização no trânsito, proporcionando, dessa forma, ferramentas que causem melhoras no desempenho do transporte veicular urbano. Também podem facilitar a aplicação de recursos públicos, uma vez que são mais acessíveis aos órgãos gerenciadores do trânsito de cidades, os quais geralmente dispõem de baixos recursos financeiros e de poucos recursos tecnológicos.

Nesse sentido, o presente trabalho consiste na investigação e proposta de aplicação de dois modelos matemáticos de otimização que, implementados, possam fornecer tempos de verde otimizados, com o objetivo de reduzir o tempo de percurso veicular em regiões urbanas com cruzamentos semaforizados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho consiste em investigar e propor modelagens matemáticas de otimização para programação de semáforos que, implementadas, forneçam de forma otimizada tempos de verde que reduzam o tempo de percurso veicular nas regiões centrais de cidades de médio e grande porte, cujo trânsito é intenso e controlado por semáforos.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Estudar modelos matemáticos, baseados em conceitos da engenharia de tráfego, que envolvam as variáveis do trânsito.
- b) Investigar e propor técnicas matemáticas de otimização adequadas para programação semafórica.
- c) Automatizar os modelos.
- d) Efetuar simulações com o objetivo de comparar os resultados obtidos para os modelos estudados, com exemplo da literatura técnica e entre si, buscando identificar qual possui melhor desempenho.
- e) Realizar um estudo teórico na região central da cidade de Passo Fundo, RS, comparando os resultados propostos pelos modelos com a situação atual do trânsito na região.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro tem-se a introdução, onde se apresenta um panorama geral dos problemas atuais do trânsito da maioria das cidades, com suas causas e consequências, bem como os benefícios que as técnicas de otimização podem proporcionar ao trânsito, assim como os objetivos que se pretende alcançar com este trabalho e a estrutura do trabalho desenvolvido.

O segundo capítulo contém a revisão de literatura realizada sobre o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho, onde são citados diversos autores que abordam assuntos referentes a modelagem matemática, otimização e engenharia de tráfego.

No terceiro capítulo apresentam-se dois modelos matemáticos estudados e propostos para a otimização de tráfego. No quarto capítulo são descritos dois exemplos teóricos de aplicação das formulações investigadas, um deles retirado da literatura e o outro desenvolvido considerando dados reais para a região central do município de Passo Fundo.

Ao final do trabalho, expõem-se as conclusões obtidas com o estudo e as referências bibliográficas consultadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentam-se conceitos teóricos disponíveis na literatura necessários para a realização deste trabalho. Inicialmente, aborda-se, de modo geral, o processo de modelagem matemática para, posteriormente, serem tratadas questões específicas sobre otimização. Em seguida, são revisados conceitos gerais sobre engenharia de tráfego, a modelagem matemática proposta por Webster e faz-se a descrição de alguns *softwares* construídos especificamente para a otimização do tráfego urbano.

2.1 Modelagem matemática

A modelagem matemática consiste no processo matemático elaborado a partir do estudo de um problema real, o qual tem como finalidade descrever a realidade através de um modelo matemático abstrato e, assim, obter suporte para sua representação simplificada, solução e análise. (GOLDBARG & LUNA , 2005).

Além de possibilitar investigar recursos matemáticos adequados para a solução de um problema específico, a modelagem matemática possibilita também a construção de estruturas matemáticas que podem ser aplicadas em outras situações-problema de natureza semelhante. Segundo Biembengut, “a modelagem matemática é, assim, uma arte, ao formular, resolver e elaborar expressões matemáticas que valham não apenas para uma solução particular, mas que também sirvam, posteriormente, como suporte para outras aplicações e teorias” (1999, p. 20).

Ainda de acordo com Biembengut, para o desenvolvimento do processo de modelagem matemática são necessários alguns procedimentos, que podem ser agrupados em três etapas: a interação, matematização e modelo matemático. A autora descreve essas etapas da seguinte maneira:

Interação: é o reconhecimento da situação-problema, ou seja, familiarizar-se com o assunto a ser modelado.

Matematização: é a parte mais complexa, na qual será formulado e resolvido o problema. Nesta etapa se traduz a situação-problema para uma linguagem matemática, mas para isso o indivíduo tem de ter um aguçado conhecimento sobre as entidades matemáticas usadas na formulação. A informática também é imprescindível nesta etapa, com seus *softwares*, para a resolução automática dos problemas matemáticos obtidos.

Modelo matemático: é a etapa em que se dá interação da solução, ou seja, uma investigação para verificar o nível da aproximação da situação-problema em relação à realidade, avaliando quão significativa e relevante é a solução e qual sua veracidade, em outras palavras, se a aproximação do resultado condiz com a realidade. (BIEMBENGUT, 1999, p. 22-25).

Esse esquema da modelagem pode ser descrito por um fluxograma, conforme a Figura 1.

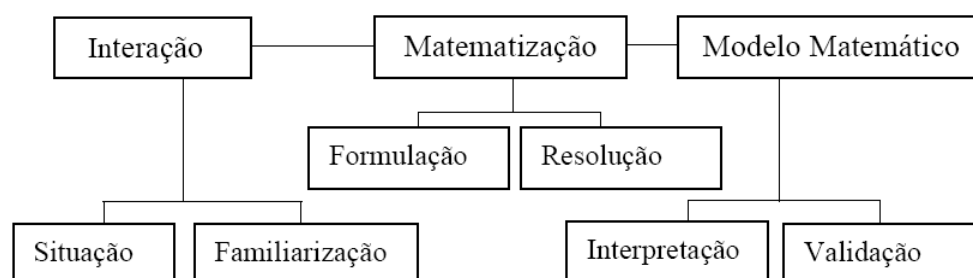


Figura 1: Esquema da modelagem. (BIEMBENGUT, 1999, p.23).

Outro estudioso sobre o tema modelagem é Bassanezzi, o qual afirma:

Quando se procura refletir sobre uma porção da realidade, na tentativa de explicar, de entender, ou de agir sobre ela, o processo usual é selecionar, no sistema, argumentos ou parâmetros considerados essenciais e formalizá-los através de um sistema artificial: o modelo. (2002, p.19).

Bassanezzi (2002, p.20) relata que o modelo matemático é a representação de um sistema, ou seja, um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam de alguma forma o objeto estudado.

Dessa forma, um modelo matemático é uma representação abstrata, ou uma aproximação, de um problema real. Tal representação pode ser expressa em termos de expressões matemáticas (equações), por meio de uma série de células inter-relacionadas em uma planilha de cálculo, entre outras. Em qualquer que seja o caso, o propósito de um modelo matemático é representar a essência de um problema de forma concisa. Isso traz uma série de vantagens, como permitir ao analista uma melhor compreensão do problema em estudo.

Bassanezzi (2002, p. 19-22) classifica modelo matemático de duas maneiras: modelo objeto e modelo teórico. O autor descreve como sendo um modelo objeto a representação de um objeto ou fato concreto, como, por exemplo, um desenho, um mapa, a representação de um fenômeno através de uma equação diferencial etc. A característica principal deste é ser parcial, deixando escapar variações individuais e pormenores do fenômeno ou objeto modelado.

Por sua vez, o modelo teórico, segundo o autor, é definido como aquele vinculado a uma teoria geral existente, cuja principal característica é manter as mesmas características do sistema real, isto é, deve representar as mesmas variáveis essenciais representadas no fenômeno e suas relações são obtidas por meio de experimentos reais.

Para Bassanezzi (2002, p. 20-22), os modelos matemáticos também podem ser classificados, conforme o tipo de matemática utilizada, como:

- **Linear ou não linear:** baseando-se na característica de suas equações básicas.
- **Estático:** é a representação da forma do objeto; exemplo disso é a representação geométrica de uma curva que representa o crescimento populacional.
- **Educacional:** quando baseado em um número pequeno de símbolos, tais modelos envolvem uma ou duas variáveis, isoladas da complexidade de outras relações do sistema fenomenológico. Geralmente, esses modelos não são muito precisos, porém trazem experiências para a formulação de um modelo mais adequado.
- **Estocástico ou Determinístico:** são modelos que em determinado instante possuem informações suficientes para previsões precisas para todo o futuro do sistema.

De acordo com Bassanezi (2002), a modelagem matemática deve seguir a sequência de etapas apresentada na Figura 2.

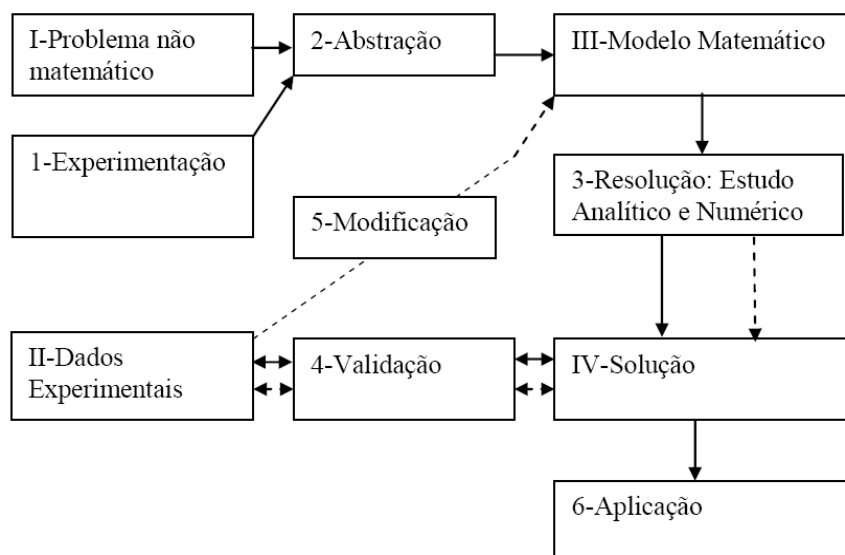


Figura 2: Esquema de uma modelagem. (BASSANEZI, 2002, p.27).

Bassanezi (2002, p. 27 - 31) define cada etapa do fluxograma do seguinte modo:

1. **Experimentação:** é onde se processa a obtenção dos dados, na qual a contribuição de um matemático é fundamental, direcionando a pesquisa no sentido de facilitar, posteriormente, os cálculos dos parâmetros envolvidos no modelo matemático a ser construído.
2. **Abstração:** é a formulação do modelo matemático, quando devem ser claramente definidas as variáveis. É a etapa onde deve ser esclarecido o que se pretende resolver.
3. **Resolução:** a resolução de um modelo está sempre vinculada ao grau de complexidade empregado em sua formação e muitas vezes só pode ser realizada por meio de métodos computacionais. Nesta etapa, a resolução do modelo é uma atividade que pode estar completamente desvinculada da realidade, onde se buscam técnicas adequadas para resolução do modelo proposto.
4. **Validação:** é o processo de verificação para aceitação ou não do modelo proposto. É a etapa onde a solução obtida é comparada com a realidade, na qual

o grau desejado para a previsão da solução será o fator preponderante para sua validação.

5. **Modificação:** é quando a solução do modelo não conduz a previsões corretas e definitivas, sendo a que a reformulação para ajustes no modelo consiste numa das partes fundamentais do processo de modelagem.

Segundo Andrade (1989, p. 18-19), os modelos matemáticos também podem ser divididos em dois grandes grupos: os modelos de simulação e os modelos de otimização. O autor define os dois modelos da seguinte forma:

- **Modelo de Simulação:** representa o mundo real, permitindo a análise de alternativas antes das suas implementações, proporcionando uma liberdade e uma flexibilidade considerável com relação à escolha mais adequada. Dessa forma, oportuniza ao administrador do problema prever através de simulações o que aconteceria em cenários hipotéticos, caso optasse por realizar tais procedimentos, o que possibilita optar pela opção mais adequada.
- **Modelo de Otimização:** é estruturado para escolher, dentre as soluções existentes para o problema, a melhor solução possível que otimize um determinado objetivo estabelecido pelo administrador do problema, tendo em vista os recursos disponíveis para o problema real. Neste caso, esta solução (caso exista) é considerada como uma solução ótima para o objetivo estabelecido. Em geral, a solução é obtida por métodos sistemáticos de resolução, realizada através de algoritmos.

Os modelos de simulação e otimização diferenciam-se pela liberdade de escolha, ou seja, os modelos de simulação permitem mais de uma alternativa de escolha, ao passo que os modelos de otimização permitem uma única solução, a solução ótima.

Diante do fato de o processo de otimização ser um dos principais assuntos referentes aos resultados do presente trabalho, a otimização, os modelos de otimização e técnicas adequadas de resolução são abordados a seguir.

2.2 Otimização

A otimização consiste em encontrar uma solução ótima para um objetivo previamente estabelecido, que seja a melhor possível, dentre de um conjunto de soluções possíveis para uma situação-problema, ou seja, que respeite as limitações existentes. Para obter essa solução é necessário todo um processo de análise e estudo do problema, o qual vai desde a modelagem, a formulação da função objetivo com suas restrições, a escolha e aplicação de técnicas apropriadas para a solução, até a validação dos resultados.

De acordo com Poltosi (2005, p. 1), a otimização é o processo utilizado para determinar a melhor solução dentre um conjunto de soluções, o que é realizado por meio de um modelo matemático que descreve o problema em questão, sendo que este contém os recursos, as restrições, as variáveis de decisão e o objetivo a ser alcançado.

2.2.1 Modelos de otimização

Como descrito acima, para otimizar uma situação-problema, seja real, seja fictícia, é necessário um modelo. Esse é composto por variáveis que representem de forma mais precisa possível a realidade do problema.

De acordo com Goldbarg & Luna (2005, p. 4), “um modelo não é igual à realidade, mas suficientemente similar para que as conclusões obtidas através de suas análise e/ou operação possam ser estendidas à realidade”.

Para a formulação desse modelo, segundo os mesmos autores, é indispensável definir:

- a estrutura relacional do sistema representado;
- o comportamento funcional de cada subsistema ou componente atômico;
- os fluxos de inter-relacionamento.

As principais características dos modelos de otimização são:

- obtenção das propriedades analíticas do modelo;
- destaque em uma melhoria mensurável do processo, baseado no conceito de otimização diante de possuir mais de uma solução;
- reconhecimento explícito das interações no modelo.

Na otimização é necessária uma função matemática de recursos (variáveis de decisão) que descreva a quantidade a ser maximizada ou minimizada.

De acordo com Lachtermacher (2007, p. 16), “as relações entre as variáveis são formalizadas através de restrições ao problema, expressas como equações e/ou inequações matemáticas”.

De maneira geral, os problemas de programação matemática podem ser representados da seguinte forma:

Otimizar: $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Sujeito a:

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \geq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{array} \right.$$

onde:

x_i : quantidades das variáveis utilizadas ($i = 1, 2, \dots, n$);

b_j : quantidade disponível de determinado recurso; ($j = 1, 2, \dots, m$);

X : vetor de x_i ;

$f(X)$: função objetivo;

$g_j(X)$: funções utilizadas nas restrições do problema ($j = 1, 2, \dots, m$);

n : número de variáveis de decisão;

m : número de restrições do modelo.

Em otimização, sempre que possível, objetiva-se a construção de um modelo simbólico que possibilite o tratamento quantitativo do sistema e suas propriedades.

Conforme Goldberg & Luna,

o segredo do sucesso do modelo de otimização depende da adequação de sua tradução, também denominada “formulação”. O próprio termo “formular”, largamente empregado para exprimir o processo de construção de modelos de otimização, traz consigo enorme carga *quantitativa e matemática*. Por outro lado, a adequação pretendida depende também de elementos que escapam ao conteúdo estritamente técnico, envolvendo a percepção do elaborador do modelo (ou equipe de elaboração), uma faculdade cognitiva de alto nível. As *fórmulas* ou *equações* do modelo não existem prontas ou acabadas na natureza, elas têm que ser identificadas ou criadas. (2005, p. 9).

Problemas de otimização podem ser divididos em diversas áreas, de acordo com suas características, dentre os quais se destacam três grandes áreas: Programação Linear (PL), Programação Não Linear (PNL) e Otimização Combinatória.

2.2.2 Programação linear

Segundo Bastos (2004, p. 14), o problema de PL consiste na otimização (maximização ou minimização) de uma função linear de várias variáveis, chamada de função objetivo, onde as variáveis estão sujeitas a restrições, também lineares.

De forma genérica, um problema de PL é formulado da seguinte forma:

$$\text{Max(min): } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Sujeito a

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

onde: n : número de variáveis de decisão e

m : número de restrições.

Segundo o autor, além das restrições funcionais, as variáveis estão sujeitas a restrições de não negatividade.

Em problemas de PL, apenas existem ótimos globais, o que facilita a obtenção da solução ótima, caso exista.

Na resolução exata de um PL destaca-se o uso do algoritmo simplex, o qual foi considerado como um dos algoritmos mais importantes do século XX para a programação matemática, o qual sempre converge através de uma sequência finita de passos para o ótimo global, caso o mesmo exista. (GOLDBARG & LUNA, 2005, p. 91).

2.2.3 Programação não linear

De acordo com Bastos (2004, p. 14), frequentemente, problemas de otimização não apresentam como composição funções objetivo lineares, tornando-se necessário tratar diretamente problemas de Programação Não Linear (PNL).

Os problemas de PNL podem ser formulados da seguinte forma:

Max(min): $f(x)$

sujeito a :

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq b_i, & i = 1, \dots, m \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

onde: $f(x)$ é a função objetivo e $g_i(x)$ são as funções de restrições das n variáveis de decisão.

Não existe algoritmo específico para resolver cada problema, no entanto diversos algoritmos vêm sendo desenvolvidos para problemas de PNL, podendo-se citar: Programação quadrática, Programação convexa, Multiplicadores de Lagrange, Gradiente reduzido e Direções factíveis. (BASTOS, 2004, p. 16).

2.2.4 Problemas de otimização combinatória

O problema de Otimização Combinatória, em geral, resume-se a encontrar, dentre todos os possíveis subconjuntos de valores para as variáveis, aquele que represente a solução ótima do problema, ou seja, que otimize um objetivo específico a ser alcançado.

A Otimização Combinatória é utilizada em problemas cujo espaço das soluções geralmente é grande, em virtude das diversas combinações possíveis entre as variáveis que geram as possíveis soluções para o problema analisado.

Um exemplo clássico de problema de otimização combinatória é o do caixeiro-viajante, em que um viajante deve visitar n cidades através de um roteiro que o possibilite visitar cada cidade uma única vez, iniciando e terminando a sua viagem na mesma cidade, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida. O número total de soluções possíveis para este problema é $(n-1)!$, onde o n representa o número de cidades envolvidas.

Assim, o problema do caixeiro-viajante consiste na procura de um circuito que possua a menor distância, começando numa cidade qualquer, entre várias possibilidades existentes, visitando cada cidade precisamente uma vez e regressando à cidade inicial. (NILSSON, 1982).

Conforme Poltosi,

os problemas de Otimização Combinatória têm por objetivo assinalar valores a um conjunto de variáveis de decisão, de tal modo que uma função dessas variáveis (função-objetivo) seja otimizada na presença de um conjunto de restrições. Formalmente, um problema de otimização combinatória é definido através de um conjunto finito $N=\{1,\dots,n\}$, com pesos c_j associados a cada $j \in N$, e um conjunto F formado por subconjuntos viáveis de N . Deseja-se determinar elementos de F , tais que o somatório dos pesos associados seja ótimo. Uma solução é viável quando os valores atribuídos às variáveis não violam nenhuma restrição. F é chamado de espaço de busca ou de soluções. (2004, p. 1).

Para determinar a solução de um problema de otimização combinatória existem duas classes de métodos, os exatos, que buscam a solução ótima, e os não exatos, que buscam uma solução aproximada, sendo esta a mais próxima possível da solução ótima.

De acordo com Bastos:

dois métodos são utilizados para guiar a busca da solução ótima no espaço de estados: os métodos exatos e os métodos heurísticos. Os métodos exatos de busca utilizam conceitos de programação matemática e grafos, onde todo o espaço de estados é vasculhado na busca da solução ótima. Já os métodos heurísticos têm o objetivo de encontrar soluções próximas a uma solução ótima. (2004, p. 14).

2.2.5 Resolução de problemas de otimização

Um problema de otimização pode apresentar como solução um ótimo global ou um ótimo local. Um ótimo global é a melhor de todas as soluções possíveis e o ótimo local é a melhor solução de um subconjunto de possíveis soluções, não sendo, necessariamente, a melhor solução global.

Na Figura 3 estão representadas, geometricamente, as soluções viáveis de uma função objetivo para um problema de minimização. Na figura pode-se observar que S1 corresponderia a um ótimo local e S2, ao ótimo global no intervalo considerado.

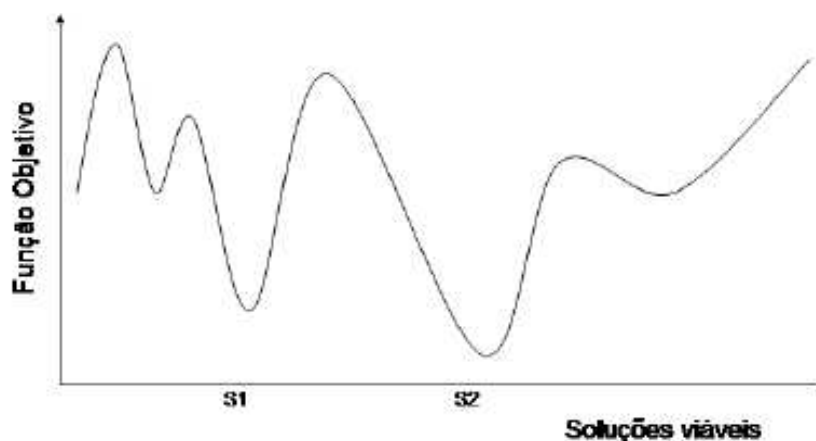


Figura 3: Ótimo local e global. (POLTOSI, 2005, p. 2).

Conforme Poltosi (2005, p. 3), para problemas de otimização convexos, ou seja, que possuem soluções ótimas únicas, existem os métodos exatos (também chamados “determinísticos”) eficientes para sua resolução. Porém, existe também a classe de

problemas não-convexos, cujas soluções por meio desses se torna intratável. Nestes casos, surge a necessidade de utilização de métodos não-exatos (ou não determinísticos). Além disso, na prática, muitas aplicações reais não exigem uma solução exata, tornando aceitável o uso de métodos que obtenham soluções aproximadas. Os métodos indicados para essa classe de problemas são as heurísticas e meta-heurísticas.

Heurísticas: são consideradas como ferramentas para resolver problemas de otimização difíceis, onde geralmente a função objetivo possui diversos máximos e mínimos locais, sendo de difícil alcance o máximo ou mínimo global.

Os métodos heurísticos, por serem aproximativos, não garantem a determinação de soluções ótimas, embora eventualmente as encontrem. Nem sempre é possível determinar o quanto a solução encontrada está próxima da solução ótima. As heurísticas têm sido utilizadas com bastante sucesso em vários tipos de problemas e costumam fornecer bons pontos de partidas para atingir uma melhor solução. Como as heurísticas são algoritmos específicos para um caso, é preciso ter conhecimento específico do problema. O sucesso está fortemente baseado na experiência de um especialista na área do problema. O desenvolvimento da heurística pode demandar um longo tempo de testes e ajustes até encontrar uma solução realmente satisfatória. (POLTOSI, 2005, p. 1).

Uma solução encontrada através de uma heurística pode não ser a melhor, a solução global, porém, pode ser próxima da ótima, satisfazendo aos interesses do avaliador.

Uma heurística é uma técnica que busca alcançar uma boa solução utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada ou, ainda, em muitos casos, ambas, especialmente nas ocasiões em que essa busca partir de solução viável próxima ao ótimo. (GOLDBARG & LUNA, 2005, p. 196).

Meta-heurísticas: têm como finalidade gerar procedimentos de busca nas vizinhanças do espaço de pesquisa, evitando uma parada prematura em ótimos locais e proporcionando, assim, soluções melhores. Utilizam escolhas aleatórias combinando os conhecimentos obtidos de resultados anteriores para se guiar através do espaço de pesquisa do problema.

Segundo Poltosi:

As meta-heurísticas, por sua vez, são procedimentos computacionais e matemáticos que foram criados inspirados em outras ciências como a física, a biologia, etc. Funcionam como uma estratégia mestre que guia e modifica outras heurísticas para produzir soluções além daquelas que são normalmente geradas por buscas locais. Podem ser aplicados em vários tipos de problemas, não apenas para um determinado problema específico. Oferecem maior facilidade para incorporar novas restrições sem perda significativa de desempenho. Garantem a obtenção de uma solução boa, nem sempre a ótima, mas possuem mecanismos para não ficarem presas a ótimos locais. Consumindo mais recursos computacionais é possível chegar à solução ótima. (2005, p. 5).

Já na definição de Arroyo,

as meta-heurísticas são métodos inteligentes flexíveis, pois possuem uma estrutura com componentes genéricos que são adaptados ao problema que se quer resolver. Estes métodos possuem certa facilidade em incorporar novas situações e exploram o espaço de soluções permitindo a escolha estratégica de soluções piores que as já encontradas, na tentativa de superar a otimalidade local. Mesmo não garantindo otimalidade global, as meta-heurísticas podem encontrar uma grande quantidade de ótimos locais. (2002, p. 3).

Existem várias meta-heurísticas que apresentam princípios e estratégias distintas, para se realizar o processo de otimização. Dentre elas, para o desenvolvimento do presente trabalho, optou-se pelo emprego pela meta-heurística *Simulated Annealing*, por se tratar de uma técnica eficiente na resolução de problemas de otimização combinatória, a qual está apresentada a seguir.

2.2.6 *Simulated Annealing*

O *Simulated Annealing* é um método de otimização classificado como uma meta-heurística, originado de um processo térmico, dito *annealing* ou recozimento, utilizado em metalurgia para obtenção de estados de baixa energia num sólido.

O método de otimização foi originalmente proposto por Kirkpatrick et al. (1983), o qual se baseou na fundamentação teórica sobre a simulação do processo de recozimento proposto por Metrópolis et al. (1953).

Melo e Lima explicam que:

O processo consiste de duas etapas: na primeira a temperatura do sólido é aumentada para um valor máximo no qual ele se funde; na segunda o resfriamento deve ser realizado lentamente até que o material se solidifique, dando-lhes uma melhor configuração com menor energia interna, para como resultado prático, uma redução dos defeitos do material.

De forma análoga, o algoritmo de arrefecimento simulado substitui a solução atual por uma solução próxima, isto é, na sua vizinhança no espaço de soluções, escolhida de acordo com uma função objetivo e com uma variável T (dita Temperatura, por analogia). Quanto maior for T , maior a componente aleatória que será incluída na próxima solução escolhida. À medida que o algoritmo progride, o valor de T é decrementado, começando o algoritmo a convergir para uma solução ótima, necessariamente local. (2009, p.3)

A meta-heurística *Simulated Annealing* tem como uma das principais vantagens permitir testar soluções distantes da solução atual, proporcionando um espaço de busca maior em relação aos métodos exatos.

Esta técnica inicia o processo de otimização através de uma solução inicial qualquer, considerada como solução atual, e para busca de valores otimizados são geradas soluções aleatórias para o problema. Se no processo surgirem soluções melhores, estas naturalmente são aceitas e o processo de busca reinicia a partir da nova solução encontrada. Porém, caso a solução gerada seja pior que a solução anterior, a aceitação será dada por um critério probabilístico, no qual se considera uma função aceite p , definida por: $p = \exp(-\Delta f / T)$, onde T é um parâmetro do método, chamado de temperatura e que regula a probabilidade de pioras, e Δf é a variação da função objetivo entre o valor da solução considerada como atual e a solução vizinha, gerada aleatoriamente.

Definida a função de aceite, o critério de aceitação é realizado da seguinte forma: se gera um número aleatório retirado de uma distribuição uniforme no intervalo $[0, 1]$ e se este número for menor ou igual a " p ", aceita-se a solução; em caso contrário, a solução atual é mantida.

Segundo Melo e Lima (2009, p.1), a cada geração de um novo vizinho s' de s , é testada a variação Δ do valor da função objetivo, isto é, $\Delta = f(s') - f(s)$, onde se têm as seguintes situações:

- $\Delta < 0$: Há uma redução de energia, significando que implica que a nova solução é melhor que a anterior. O método aceita a solução e s' passa a ser a nova solução corrente.

- $\Delta = 0$: Caso de estabilidade, não há redução de energia. Na verdade, situação pouco provável de acontecer na prática. A aceitação da solução é, portanto, indiferente.
- $\Delta > 0$: Houve um aumento do estado de energia. A aceitação deste tipo de solução é mais provável a altas temperaturas e bastante improvável a temperaturas reduzidas.

Um algoritmo básico do *Simulated Annealing* pode ser visualizado na Figura 4 (SOUZA, 2000).

Assim, no processo, a temperatura inicial T_0 recebe um valor elevado e, após um número fixo de iterações (denominado no algoritmo por SA_{max} , o qual representa o número de iterações para o sistema atingir o equilíbrio térmico em uma dada temperatura, ou seja, corresponde ao número de cálculos da função objetivo para a mesma temperatura), a temperatura é gradativamente diminuída por uma razão de resfriamento α , onde: $T_n \leftarrow \alpha T_{n-1}$, sendo $0 < \alpha < 1$.

```

Algoritmo SA ( $\alpha, SA_{max}, T_0, s$ )
1    $s^* \leftarrow s$ ;   {melhor solução obtida até então}
2   IterT  $\leftarrow 0$ ; {Número de iterações na temperatura  $T$ }
3    $T \leftarrow T_0$ ;   {Temperatura Corrente}
4   enquanto ( $T > 0$ ) faça
5       enquanto (IterT <  $SA_{max}$ ) faça
6           IterT  $\leftarrow$  IterT + 1;
7           Gere um vizinho qualquer  $s' \in N(s)$ ;
8            $\Delta = f(s') - f(s)$ ;
9           se ( $\Delta < 0$ )
10              então
11                   $s \leftarrow s'$ ;
12                  se ( $f(s') < f(s^*)$ )
13                      então  $s^* \leftarrow s'$ ;
14              senão
15                  Escolha  $x \in [0, 1]$ ;
16                  se ( $x < e^{-\Delta/T}$ ) então  $s \leftarrow s'$ ;
17           fim-se;
18       fim-enquanto;
19        $T \leftarrow \alpha \times T$ ;
20       IterT  $\leftarrow 0$ ;
21   fim-enquanto;
22    $s \leftarrow s^*$ ;
23   Retorne  $s$ ;
fim SA;

```

Figura 4: Algoritmo *Simulated Annealing*. (SOUZA, 2000, p. 14).

Conforme Souza (2000, p. 13), α , T_0 e SA_{max} são os parâmetros de controle do método.

No início do procedimento, quando a temperatura é alta, há uma chance maior de se escapar de mínimos locais, pois são aceitos mais pontos avaliados nas vizinhanças da solução considerada. No entanto, à medida que T se aproxima de zero, o algoritmo comporta-se como o método de descida, uma vez que diminui a probabilidade de se aceitarem movimentos que possam piorar a solução encontrada. O procedimento é finalizado ao chegar a temperatura a um valor próximo de zero, quando soluções que pioram o valor da função objetivo não são mais aceitas, o que significa que o sistema está estável e evidencia o encontro de um ótimo local.

Em resolução de problemas reais também é comumente usado o procedimento chamado *Reannealing*, que consiste novamente na aplicação do método *Simulated Annealing*, tomando como solução inicial a solução otimizada obtida do processo de otimização inicial. Neste caso, o procedimento representaria o reaquecimento, seguido de um novo processo de resfriamento, o que possibilitaria uma nova busca por soluções melhores, quando a quantidade de movimentos consecutivamente rejeitados é baixa. Também é possível se trabalhar com taxa de resfriamento menor quando as temperaturas são mais altas e aumentá-la à medida que a temperatura vá sendo reduzida. (MELO e LIMA, 2009, p.4).

Na realização do processo de otimização de tráfego semaforizado, além dos conceitos gerais sobre modelagem matemática e otimização apresentados, para compreensão e obtenção dos modelos matemáticos utilizados também foram necessários conhecimentos gerais sobre engenharia de tráfego, apresentados no Item 2.3, a seguir.

2.3 Engenharia de tráfego

A engenharia de tráfego é um ramo da ciência destinada ao estudo de conceitos pertinentes a elementos dos sistemas de tráfego em geral, contribuindo decisivamente para os planejamentos e tomadas de decisões relacionadas ao trânsito. Assim:

Engenharia de Tráfego é a área do conhecimento que tem como objetos de estudo o planejamento, projeto geométrico e operação de tráfego em vias, suas redes, terminais, lotes lindeiros e relações com outros modos de transporte. Tem como objetivo assegurar o movimento seguro, eficiente e conveniente de pessoas e bens. (PIGNATARO, 1973 apud SILVA, 2001, p. 2).

Para desenvolvimento do presente trabalho foram considerados os seguintes conceitos básicos de engenharia de tráfego, definidos conforme Brasil (1984, p. 15-27):

- a) **Semáforo:** é um dispositivo de controle de tráfego que, através de indicações luminosas transmitidas para motoristas e pedestres, é responsável por alternar ciclicamente e sequencialmente o direito de passagem de veículos ou pedestres em interseções de duas ou mais vias. O semáforo compõe-se por três focos de luzes, de cores vermelha (significando que os veículos devem parar antes de entrar na interseção), amarela (significando atenção, ou seja, um período intermediário entre bloqueio e desbloqueio, para que não haja uma interrupção brusca do movimento) e verde (significando a concessão do direito de passagem).
- b) **Aproximações:** são os trechos de via que convergem para a interseção, ou seja, as regiões onde os veículos esperam pela concessão de passagem.
- c) **Fase:** é a aplicação completa de uma sequência de indicação de cores de um semáforo. O número de fases de uma interseção em geral é igual a três e depende, basicamente, do número de aproximações, dos volumes de conversão e dos conflitos entre os movimentos.
- d) **Estágio ou intervalo:** é o período de tempo dentro do ciclo dado a cada uma das cores da sequência.
- e) **Diagrama Estágio:** é a representação esquemática da sequência de movimentos, permitidos e proibidos para cada intervalo de ciclo. Este pode ser representado como o exemplo da Figura 5, com 12 movimentos possíveis, onde dois grupos focais (semáforos) estão associados a cada fase. As setas representam os movimentos permitidos em cada estágio; as setas com traço representam os movimentos não permitidos (conflitantes), e as setas curvas, as conversões permitidas.

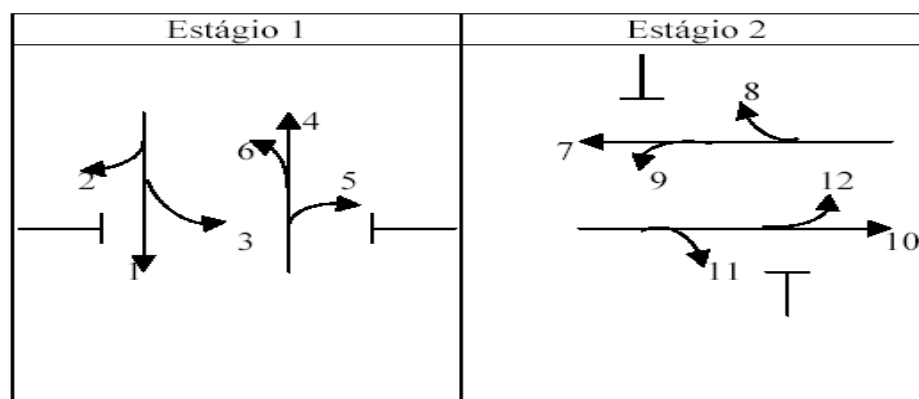


Figura 5: Diagrama de estágios. (BRASIL, 1984, p. 25).

- f) **Ciclo:** é o tempo total, em segundos, para a completa sequência de sinalização de uma interseção.
- g) **Controlador de tráfego:** juntamente com o semáforo, é o meio pelo qual se efetua o controle dos movimentos veiculares numa malha viária. Existem, quanto aos tempos, dois tipos básicos de controladores:
- (i) **Controladores de tempo fixo:** nestes controladores o tempo de ciclo é constante, e a duração dos estágios e seus instantes de mudança são fixos em relação ao ciclo. Assim, para uma dada interseção, é dado sempre o mesmo tempo de verde, amarelo e vermelho a cada corrente de tráfego, independentemente da variação do volume de veículos que chegam às proximidades da interseção. A duração dos estágios é calculada em função das características e volumes médios do tráfego em cada interseção.
 - (ii) **Controladores por demanda de tráfego:** são providos de detectores que podem perceber a demanda atual de veículos numa corrente de tráfego, além de possuírem uma lógica interna de decisão baseada em parâmetros de *performance* da interseção. Sua finalidade é conceder o tempo de verde a cada corrente de tráfego (fase) de acordo com sua demanda atual, ajustando-se dinamicamente às flutuações de tráfego que possam ocorrer num cruzamento.
- h) **Estratégia de operação:** o tipo de controle implementado é em função da estratégia de operação adotada para o local, que pode ser:
- (i) **Controle isolado do cruzamento:** o controle dos movimentos de tráfego baseia-se apenas nos volumes de veículos existentes no cruzamento, não sendo

consideradas as eventuais influências exercidas pelas interseções sinalizadas adjacentes. Sempre que possível, os tempos de ciclo devem se situar entre 40 e 80 segundos.

(ii) Controle arterial de cruzamentos (rede aberta): este tipo de controle se preocupa em operar os semáforos de uma via principal (corredor) de forma a dar continuidade de movimentos entre interseções adjacentes. Este tipo de controle é também chamado “sistema progressivo” ou “onda verde”.

(iii) Controle de cruzamentos em área (rede fechada): neste tipo de controle são consideradas todas as interseções sinalizadas de determinada malha ou região viária, ou seja, cada interseção na vizinhança é considerada para o estabelecimento dos planos de tráfego.

i) **Plano de tráfego ou programação de semáforos:** é a configuração completa de um sinal ou interseção, constituído pelo tempo de ciclo, duração e instantes de início de cada estágio.

Além dos conceitos básicos apresentados, necessários para otimização do tráfego, foi necessário abordar o estudo de métodos para cálculos dos parâmetros de controle do trânsito e de outros parâmetros de desempenho, para a regulação de semáforos isolados, conforme apresentado a seguir.

2.3.1 Regulação de semáforos isolados

Segundo Brasil (1984, p. 61), a regulação de semáforos proporciona o bom desempenho do tráfego em termos de fluidez e segurança. Dentre os vários métodos de cálculos desenvolvidos para estabelecer as configurações de semáforos destaca-se o de Webster, o qual, por ser completo e detalhado, possibilita a determinação dos tempos semafóricos, garantindo melhor desempenho do tráfego nas interseções.

Lima afirma:

Ao se estudar o problema de controle de tráfego de interseções, é necessária uma análise detalhada das características de uma dada interseção, observando fatores tais como capacidade de suas aproximações, geometria, localização, dentre outros fatores que interferem direta ou indiretamente no atendimento às solicitações de demanda da interseção como um todo. (2005, p. 42).

Como já foi dito, Brasil (1984, p. 62) define o fluxo de saturação de uma interseção como sendo o fluxo que seria obtido se houvesse uma fila de veículos na aproximação e a ela fossem dados 100% de tempo de verde do cruzamento (escoamento ininterrupto), expresso em unidade de veículos por hora de tempo de verde (veículos/htv).

De acordo com Brasil (1984, p. 28), a capacidade de uma aproximação sinalizada é definida como sendo o número máximo de veículos capazes de atravessar uma interseção num dado período de tempo. É determinada pelo fluxo de saturação e pelo tempo de verde do semáforo: quanto maior o tempo de verde, maior a quantidade de veículos liberados.

Também deve ser considerado o fato de que o tempo de verde de uma dada fase não é totalmente aproveitado. No início do tempo de verde há uma perda ou atraso inicial, em razão do tempo que o motorista leva para atingir a velocidade normal de operação. Nesta etapa a taxa de escoamento de veículos é baixa.

À medida que o tempo passa, essa taxa vai aumentando e, após alguns segundos, atinge um valor máximo, razoavelmente constante, que é o fluxo de saturação. Após isso, durante o término do fluxo de verde e início do amarelo, o fluxo ainda continua máximo por alguns segundos e, então, começa a decair, até atingir o valor zero.

Assim, Brasil (1984, p. 63) define o tempo de verde efetivo como o período do tempo de verde no qual ocorre o fluxo máximo de veículos (fluxo de saturação). Esse é o tempo realmente aproveitado pela fase à qual foi alocado o tempo de verde na aproximação. Define ainda o tempo perdido ou tempo morto como o tempo que se perde em virtude das reações dos motoristas no início e no fim do tempo de verde de uma dada fase e durante o qual não há fluxo.

Para o cálculo dos parâmetros de trânsito descritos acima e de outros parâmetros de desempenho necessários para a regulagem de semáforos isolados, proposto por Webster (BRASIL, 1984, p. 63-67), são utilizadas as equações descritas a seguir com suas respectivas notações.

Para determinar a capacidade de uma aproximação sinalizada, medida em veículos por hora, é multiplicado o fluxo de saturação pelo tempo de verde efetivo, dividido pelo tempo de ciclo, conforme apresentado na Equação 1.

$$C_p = S \cdot \frac{g_{ef}}{C} \quad (\text{v/h}) \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

C_p : Capacidade de uma aproximação sinalizada.

S : Fluxo de saturação.

g_{ef} : Tempo de verde efetivo.

C : Tempo ou tamanho de ciclo.

Já o tempo de verde efetivo é definido pela soma do tempo de verde normal ao tempo de amarelo, subtraídos do tempo perdido, podendo ser calculado pela Equação 2.

$$g_{ef} = (g + t_a) - I \quad (\text{segundos}) \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

g : Tempo de verde normal.

t_a : Tempo de amarelo.

I : Tempo perdido por fase.

Conforme Brasil (1984, p. 81), deve-se assegurar que a duração do período de verde de uma fase não seja inferior ao limite mínimo, estabelecido em 10s.

Quanto à determinação do tempo de amarelo, segundo Leite (1973 apud SILVA, 2001, p. 3), este deve ser da ordem de:

- 3s, quando a velocidade for menor ou igual a 50 km/h;
- 4s, quando a velocidade for maior que 50 km/h e menor ou igual a 80 km/h;
- 5s, quando a velocidade for maior que 80 km/h.

O tempo perdido por ciclo, segundo Lima (2005, p. 51), pode ser definido pelo somatório dos tempos perdidos por fase, mais o somatório dos tempos perdidos menos os tempos de amarelo das fases envolvidas, dado pela Equação 3.

$$T_p = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{i=1}^n (I - t_a)_i \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

T_p : Tempo perdido.

n : Número de fases.

I_i : Tempo perdido por fase na aproximação i .

t_{ai} : Tempo de amarelo na aproximação i .

Para o mesmo autor, caso não se faça o uso da Equação 3, o uso do tempo perdido por fase deve ser de 2 a 3s, ou deve-se considerar o tempo perdido total como a soma dos tempos de amarelo.

Seguindo com a modelagem de Webster, o fluxo de saturação de uma aproximação medido em veículos por hora de tempo verde pode ser estimado pela Equação 4.

$$S = 525 \cdot L \quad (\text{v/htv}) \quad (\text{Equação 4})$$

onde: L : Largura da aproximação em metros.

A taxa de ocupação de uma dada aproximação ou corrente de tráfego é a relação entre a demanda de tráfego (fluxo veicular) e o fluxo de saturação, conforme a Equação 5.

$$y = \frac{q}{S} \quad (\text{Equação 5})$$

onde: y : Taxa de ocupação.

q : Fluxo de veículos ou demanda.

A taxa de ocupação é uma medida absoluta da solicitação de tráfego numa aproximação. Por exemplo: uma taxa de ocupação $y=0,5$ corresponde a dizer que a quantidade de veículos (q), que é a solicitação atual da aproximação, é a metade da capacidade potencial máxima de atendimento.

O tempo de verde é alocado de acordo com a solicitação de atendimento das

aproximações. Logo, quanto maior for a demanda das aproximações de uma dada fase, maior o tempo de verde a ser alocado para mesma.

O grau de saturação, definido como sendo a relação entre a demanda de tráfego e a capacidade de atendimento de uma aproximação, é calculado conforme a Equação 6.

$$X = \frac{q}{C_p} \quad (\text{Equação 6})$$

onde: X : Grau de saturação.

O grau de saturação é um coeficiente que indica, dentro das condições reais de operação da interseção, o quanto a demanda está próxima da capacidade horária de escoamento. Ao se alterar a proporção de verde alocado para a aproximação, o grau de saturação será diretamente modificado. Assim, o grau de saturação é uma medida relativa da taxa de ocupação da aproximação.

Quando o grau de saturação for superior a 1, significa que a solicitação é maior que a capacidade de atendimento da aproximação, o que significaria formação de fila, gerando um congestionamento em razão dos veículos que chegam e não são atendidos. A escolha do grau de saturação, segundo Vilanova,

é a parte fundamental do modelo. A teoria indica que se opere numa faixa que vai de 80% a 90% ($0,80 \leq X \leq 0,90$). Nesta faixa obtêm-se os menores valores para o atraso total do semáforo. Se não houver fatores especiais que justifiquem outros valores, recomenda-se a adoção de $X = 0,88$ para todos os links críticos. (2009, p. 2).

Outra fórmula importante desenvolvida por Webster foi o cálculo de ciclo ótimo. O autor, através de série de estudos e simulações computacionais do comportamento do fluxo de tráfego e da relação entre atraso médio e tamanho de ciclo para intersecções sinalizadas isoladas, desenvolveu uma fórmula para o cálculo do tamanho de ciclo ótimo, em função apenas do tempo de perda total (T_p) e do somatório das taxas de ocupação críticas (y_{c_i}) (BRASIL 1984, p. 74).

$$C_o = \frac{1,5 \cdot T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_{c_i}} \quad (\text{Equação 7})$$

onde:

C_o : Tamanho de ciclo ótimo.

y_{c_i} : Taxas de ocupação crítica.

Apesar de os modelos de Webster serem, em sua maioria, originados em 1964, têm grande validade na atualidade, visto que muitos *softwares* de programação de semáforos têm como base as definições dos modelos de programação semaforicas de Webster. Este modelo também é adotado pelo Denatran (BRASIL, 1984) na determinação de tempos fixos de semáforos isolados.

Outro conceito importante para coordenação de semáforos é o atraso veicular. De acordo com Silva:

o conceito de atraso é relativo à parcela do tempo consumido em um deslocamento que excede ao tempo desejado pelo usuário. O atraso, portanto, deve-se às paradas que o motorista/veículo é obrigado a realizar ao longo do deslocamento e ao fato de trafegar com velocidade menor que a desejada. (2001, p.5).

E para Loureiro, Gomes e Pires,

o conceito de atraso veicular em interseções semaforizadas, pode ser definido, de forma genérica, como a demora causada aos veículos, em razão do tempo perdido no período de vermelho, assim como devido aos tempos de aceleração e desaceleração inerentes à formação e destruição da fila no cruzamento. Numa perspectiva mais ampla para o usuário, o atraso é uma medida de desconforto e frustração para motoristas e passageiros, além de estar relacionado com consumo de combustível e tempo de viagem perdido, sendo, portanto, um dos indicadores mais adequados para avaliar o desempenho da programação semaforica. (2002, p. 7).

Para determinação do atraso médio veicular em cruzamentos existem alguns estudos que envolvem parâmetros do trânsito de cruzamentos específicos.

Conforme Brasil (1984, p. 73), por meio de uma série de pesquisas e estudos de simulações, Webster deduziu uma fórmula da Equação 8 para o atraso médio total sofrido por um veículo.

$$d_m = \frac{C \cdot (1 - \lambda_i)^2}{2 \cdot (1 - X_i \cdot \lambda_i)} + \frac{X_i^2}{2 \cdot q_i (1 - X_i)} - 0.65 \cdot \left(\frac{C}{q_i^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot X_i^{(2+5 \cdot \lambda_i)} \quad (\text{Equação 8})$$

onde:

d_m : Atraso médio total sofrido por um veículo.

C : Tempo de ciclo.

λ_i : Relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo $\left(\frac{g_{efi}}{C} \right)$.

X_i : Grau de saturação da aproximação i .

q_i : Fluxo veicular (veículos/segundos) da aproximação i .

Os dois primeiros termos da equação referem-se a atraso uniforme e atraso aleatório, respectivamente. O terceiro termo é um fator de correção, que corresponde a cerca de 5% a 10% do atraso total.

O cálculo de atraso médio por veículo também pode ser estimado pela forma reduzida de Webster, através da Equação 9.

$$d_{mr} = \frac{9}{10} \cdot \left[\frac{C \cdot (1 - \lambda_i)^2}{2 \cdot (1 - X_i \cdot \lambda_i)} + \frac{X_i^2}{2 \cdot q_i (1 - X_i)} \right] \quad (\text{Equação 9})$$

Outra fórmula utilizada para se estimar o atraso médio por veículo, a qual é utilizada pelo modelo Transyt de programação semaforica, segundo Brasil (1984, p. 121), é dada pela Equação 10.

$$d_T = \frac{\Delta t}{A_c} \sum_{t=1}^{n_t} (A_t - D_t) + \frac{X_i^2}{4(1 - X_i)} \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

A_t : Chegada acumulada no instante t .

D_t : Escoamento acumulado no instante t .

A_c : Total de chegadas durante o ciclo.

Δt : Comprimento do intervalo de tempo $\left(\frac{C}{n}\right)$.

n_t : Número de unidades de tempo em que o ciclo é subdividido.

Na expressão anterior, o primeiro termo estima o atraso médio uniforme da aproximação i (ou seja, do link i (s)), e o segundo termo, o atraso médio aleatório aproximação i (ou seja, do link i (s)).

Silva (2001, p. 29), por sua vez, apresenta a fórmula da Equação 11 para estimação do atraso médio total.

$$D = \frac{3600}{C_{mi}} + 900T \left[\frac{V_i}{C_{mi}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_i}{C_{mi}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{C_{mi}}\right)\left(\frac{V_i}{C_{mi}}\right)}{450T}} \right] \quad (\text{Equação 11})$$

onde:

D : Atraso médio total (s/veículo).

V_i : Volume para o movimento i (vph).

C_{mi} : Capacidade do movimento i (ucp/h).

T : Período de análise (h) para um período de 15min ($T = 0,25$).

O número de paradas sofridas por veículos em uma aproximação é outro fator de desempenho usado neste trabalho, o qual, segundo Brasil (1984, p. 76), baseado nas

fórmulas de Webster, é o percentual de veículos que param na aproximação pelo menos uma vez e pode ser determinado pela Equação 12.

$$p = \frac{1 - \lambda_i}{1 + \lambda_i} \quad (\text{Equação 12})$$

onde: p : Proporção de veículos detidos (%).

Outra equação, conforme Chile (2001, p.111), que estima o percentual de veículos que param na aproximação pelo menos uma vez é a Equação 13.

$$h = \frac{1 - \lambda}{1 - y} \quad (\text{Equação 13})$$

onde:

h : Proporção de veículos detidos (%).

y : Relação entre a demanda de tráfego e o fluxo de saturação $\left(\frac{q}{S}\right)$.

Também, como conceito relevante para quantificação do nível de desempenho de uma via, tem-se o tempo de deslocamento em um conjunto de aproximação, que, segundo Gobbo (2005, p. 13), é definido pelo produto do fluxo pela soma dos atrasos mais tempo de deslocamento considerando a velocidade esperada do fluxo, conforme a Equação 14.

$$T_d = q \cdot \left(\frac{d}{V_p} + A_v \right) \quad (\text{Equação 14})$$

onde:

T_d : Tempo de deslocamento.

d : Distância da via.

V_p : Velocidade esperada de deslocamento do fluxo na aproximação.

A_v : Atraso veicular.

Conforme Silva (2001), indicadores de desempenho são variáveis usadas para valorar, quantitativamente, a capacidade segundo a facilidade avaliada, sendo considerados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Indicadores de capacidade e nível de serviço

Tipo de Facilidade	Indicador de Desempenho	Unidade
Interseções semaforizadas	Atraso médio de parada	s/veíc.
Interseções com regra de prioridade	Atraso médio total	s/veíc.
Artérias	Atraso médio total	km/h

Fonte: Silva (2001, p.3).

Como um dos objetivos do presente trabalho consistiu na investigação de modelos matemáticos de otimização e de suas implementações em linguagem computacional, que possibilitassem obter de forma automatizada tempos semaforicos que otimizassem o tempo de percurso veicular, também foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre programas computacionais já existentes nesta área, com finalidades semelhantes aos objetivos propostos no presente trabalho, apresentada a seguir.

2.3.2 Alguns softwares de programação de semáforo

Atualmente existem diversos *softwares* para a programação semaforica. Dentre esses se destacam: Siri, Atefi, Scoot e Transyt, os quais são descritos brevemente a seguir.

2.3.2.1 Siri

O Siri é um *software* simulador de tráfego desenvolvido em 2004 pela Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo, o qual teve como autor principal o engenheiro de trânsito Luis Molist Vilanova.

Em sua estrutura, a função objetivo tem como base expressões que simulam o atraso total e o número de paradas de veículos em uma via.

Segundo Vilanova (2004, p. 5), a otimização desta função é obtida através do método *hill-climbing*, com o intuito de minimizar um parâmetro denominado Índice de Desempenho, explicitado pela Equação 15.

$$ID = \sum_{l=1}^{n_l} A_l + Kp \cdot \sum_{l=1}^{n_l} NP_l \quad (\text{Equação 15})$$

onde:

ID : Índice de Desempenho da rede.

n_l : número de *links* da rede.

A_l : Atraso do *link l* da rede.

Kp : Peso da parada.

NP_l : Número de paradas do *link l* da rede.

De acordo com Gobbo:

Os algoritmos hill-climbing (método do gradiente ascendente) tomam por base o estado inicial e, incrementando e decrementando cada variável de um certo valor, determinam, por comparação ao desempenho do estado inicial, a direção da próxima busca. O algoritmo continua até que a situação atual seja melhor que os cenários com incremento e decremento do passo. Usualmente o tamanho do passo nesses algoritmos é variável para acelerar o processo de busca. Algoritmos hill-climbing garantem a obtenção da solução ótimas para funções unimodais (que não apresentam máximos e mínimos locais). Para funções multimodais o algoritmo pode evoluir para um máximo local (subótimo) e a qualidade da resposta depende do estado inicial apresentado. (2005, p. 22).

A finalidade deste simulador é calcular os melhores tempos de verde, defasagens e ciclo de uma rede semaforizada e, com isso, obter os menores tempos de espera e o menor número de paradas para seus usuários.

2.3.2.2 Atefi

O Atefi (algoritmo em tempo fixo) foi desenvolvido pela Universidade Estadual de Londrina - PR tendo como autores Piai e Cervantes (2009). Tem como finalidade fornecer planos de tempos semafóricos otimizados, objetivando a minimização do atraso e a comparação de estratégias que buscam a solução para os problemas de gerenciamento de tráfego urbano a baixo custo e adaptados à realidade da malha viária nacional.

O modelo Atefi obtém a redução do atraso veicular em três etapas: otimização do tempo de verde ou *split*, otimização da defasagem e otimização do tempo de ciclo.

Segundo Piai e Cervantes (2009, p. 3), no Atefi não se aplica nenhum tipo de heurística para a resolução do problema de otimização do tempo de verde; neste caso, o tempo de verde é calculado proporcionalmente à demanda veicular. Já defasagem é otimizada por uma heurística de busca local (*hill climbing*), onde se propõe uma configuração para a rede que será modificada até a obtenção de uma solução.

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

A avaliação e validação do Atefi foram baseadas em dados de cenários reais de demanda da malha viária central da cidade de Londrina-PR, Brasil, sendo os resultados do algoritmo comparados com o *software* comercial Transyt.

Os autores concluíram que resultados obtidos pelo Atefi foram próximos aos obtidos pelo Transyt, indicando, dessa forma, que o modelo de otimização desenvolvido está na direção de uma ferramenta para obtenção de planos a tempo fixo, para controle de tráfego, a baixo custo e com características adequadas à realidade nacional.

2.3.2.3 Scoot

O Scoot é baseado em um modelo de tráfego que tem por finalidade minimizar atrasos e paradas, pela otimização de ciclos, repartição de verde e defasagens, simulando os efeitos das alterações dessa programação sobre o tráfego dentro da área controlada.

O SCOOT trata-se de um algoritmo para otimização de repartições de tempo de verde, ciclo e defasagens, em tempo real, sendo que o programa procura modelar a

demanda e minimizar a soma das filas médias de uma área com interseções semaforizadas. (ROBERTSON, 1986).

Os otimizadores de ciclo, repartição de verde e defasagens do Scoot atuam testando pequenas alterações na programação semaforica e implementando aquelas que resultarem em benefícios no modelo de tráfego embutido.

De acordo com Loureiro, Gomes e Pires (2002, p. 3), o *software* britânico Scoot foi desenvolvido na década de 1970 pelo então *Transportation and Road Research Laboratory*. O nome “Scoot” é um acrônimo para *Split, Cycle and Offset Optimisation Technique* e resume bem sua função: trata-se de um algoritmo para otimização em tempo real de repartições de verde, ciclo e defasagens. Para os autores, é um sistema adaptativo, que responde automaticamente às flutuações no fluxo de tráfego pelo uso de detectores incorporados na via, colocados preferencialmente a cerca de 15 a 20 m da interseção.

2.3.2.4 Transyt

Segundo Beck (1999, p.24), a formulação matemática do programa Transyt (*Traffic Network Study Tool*) foi desenvolvida inicialmente por Robertson em 1967, sendo sua primeira versão computacional chamada de Transyt – 1.

O Transyt é composto de um modelo de simulação de tráfego e de um algoritmo de minimização, cuja função objetivo considera o peso combinado do número de paradas e o atraso sofrido pelos veículos em todas as aproximações da rede semaforizada. Este valor representa o custo do congestionamento, sendo denominado de Índice de Desempenho. O programa sofreu modificações no decorrer dos anos, sendo em 1981, nos Estados Unidos, lançada a versão Transyt – 7F, a qual, conforme Brasil (1984, p. 121), é composta por uma função objetivo denominada Índice de *Performance*, definida pela Equação 16.

$$IP = \sum_{i=1}^{n_i} (d_i + d'_i + KS_i) \quad (\text{Equação 16})$$

onde:

IP: Índice de *Performance*.

n_i : Número de *links* (aproximações) da rede.

d_i : Atraso médio uniforme do *link* i (s).

d'_i : Atraso médio aleatório do *link* i (s).

K : Fator de penalidade de parada.

S_i : Número médio de paradas no *link* i .

Para a obtenção do atraso médio uniforme utiliza-se a Equação 17.

$$d_i = \frac{\Delta t}{A_c} \sum_{t=1}^{n_t} (A_t - D_t) \quad (\text{Equação 17})$$

Para a obtenção do atraso médio aleatório utiliza-se a Equação 18.

$$d'_i = \frac{X_i^2}{4(1 - X_i)} \quad (\text{Equação 18})$$

Para a obtenção do número médio de parada utiliza-se a Equação 19.

$$S_i = \frac{1}{C} \sum_{t=t_r}^{t_0} a_t \quad (\text{Equação 19})$$

onde:

a_t : Chegadas de veículos no intervalo de tempo.

t_r : Instante de início do período vermelho do *link* i .

t_0 : Instante no período de verde do *link* i , no qual a fila se torna nula.

Para a aplicação do Transyt -7F são consideradas as seguintes hipóteses:

- Todas as interseções importantes devem ser sinalizadas, ou seja, possuírem semáforos como dispositivo de controle de tráfego;
- Todos os semáforos devem operar com tempos de ciclos iguais ou com metade do tamanho do ciclo, ou seja, para realizar a otimização é necessário tempos de

ciclos em comum para todas as intersecções ou, caso isso não seja possível, o tempo de ciclo deve ser a metade dos demais;

- A taxa de chegada dos veículos ao link é constante;
- O fluxo de conversão nos cruzamentos é constante ao longo do tempo, ou seja, deve ser considerada sempre a mesma quantidade de veículos que faz conversões à direita e esquerda em ambos os horários de operação das vias;
- Não existem ciclos saturados, ou seja, as filas são totalmente escoadas no primeiro tempo de verde.

O Transyt trabalha na busca de um plano semafórico, isolado ou coordenado, que cause menos penalidades ao tráfego nas aproximações modeladas, isto é, menor Índice de *Performance*, definido na Equação 16. A solução ótima é obtida por meio do processo *hill climbing*.

A página atualizada do *site* TRL *software* Bureau / United Kingdom (TRL 2011) apresenta a última versão comercial disponível - Transyt 14.0.4, lançada no dia 22 de março de 2011, onde este se diferencia das versões anteriores por causa das melhorias de modelagem e de algumas diferenças sutis de implementação em relação às demais versões.

De acordo com Robertson, autor dos modelos Scoot e Transyt,

o SCOOT é, conceitualmente, um TRANSYT em tempo real, com os dois programas compartilhando dos mesmos princípios: utilizam o conceito de perfis cíclicos de fluxo para modelar a demanda e procuram minimizar a soma das filas médias nas intersecções da sub-área. (ROBERTSON, 1986).

De modo geral, os *softwares* anteriormente citados no presente trabalho são semelhantes em seus objetivos, pois atuam em prol da minimização dos atrasos e paradas no trânsito.

Após a conclusão da fundamentação teórica, necessária para realização do presente trabalho, no próximo capítulo apresentam-se os modelos matemáticos analisados e aplicados, com a finalidade de se obterem tempos semafóricos otimizados, que possibilitem melhorar o desempenho de uma rede semaforizada.

3 MODELOS PARA OTIMIZAÇÃO DO TRÁFEGO URBANO SEMAFORIZADO

Neste capítulo são apresentados dois modelos investigados e propostos, os quais foram elaborados considerando conceitos e expressões expostos no Capítulo 2, denominados de Modelo 1 e Modelo 2. Com estes modelos matemáticos objetiva-se otimizar, através das variáveis tempos de verde, o tempo de percurso veicular em vias com trânsito semaforizado.

3.1 Modelo 1

Diante dos conceitos estudados, foi proposto um modelo que representasse de forma significativa situações reais do cotidiano do tráfego urbano semaforizado.

Assim, no Modelo 1 foram consideradas as expressões de atraso uniforme e atraso aleatório de Webster, bem como a expressão para determinação do número de paradas sofrida por um veículo, exposta em Chile (2001, p.111), sendo que no modelo em questão, o tempo de verde considerado não é o efetivo e sim o tempo de verde de operação do semáforo (verde normal), as quais serão detalhadas a seguir.

Considerando estas expressões, obteve-se uma função objetivo que representa o Índice de Desempenho de um veículo que trafega em uma via semaforizada (ID), expresso na Equação 20 como o somatório dos indicativos de desempenho de cada cruzamento da região analisada.

$$ID = \sum_{i=1}^{n_c} (AU_i + AL_i + KP_i) \quad \text{(Equação 20)}$$

onde:

ID : Índice de desempenho de uma rede semaforizada.

n_c : Número de cruzamentos.

AU_i : Atraso médio uniforme do *link* i .

AL_i : Atraso médio aleatório do *link* i .

K : Fator de penalidade de parada.

P_i : Número de paradas sofridas por um veículo no *link* i .

O valor do K , segundo Chile (2001, p. 111), pode variar de 10 a 60, dependendo da importância imposta ao número de paradas.

As composições matemáticas de cada termo estão descritas nas equações 21, 22 e 23. A expressão que corresponde ao atraso uniforme sofrido por um veículo é dada pela Equação 21.

$$AU = \frac{C \cdot (1 - \lambda n_i)^2}{2 \cdot (1 - X_i \cdot \lambda n_i)} \quad (\text{Equação 21})$$

onde:

C : Tempo ou tamanho de ciclo em segundos.

λn_i : Relação entre o tempo de verde normal e o tempo de ciclo $\left(\frac{g_i}{C}\right)$.

X_i : Grau de saturação da aproximação.

Já o cálculo do atraso aleatório é obtido pela Equação 22.

$$AL = \frac{X_i^2}{4 (1 - X_i)} \quad (\text{Equação 22})$$

O cálculo do número de paradas sofridas por um veículo pode ser obtido pela equação 23.

$$P = \left(\frac{1 - \frac{g_i}{C}}{1 - \frac{q}{S}} \right) \quad (\text{Equação 23})$$

onde:

g_i : Tempo de verde.

S : Fluxo de saturação.

q : Fluxo veicular.

As equações 21, 22 e 23 descritas simulam, em situações reais, a periodicidade desses fatores de desempenho, ou seja, do atraso uniforme, atraso aleatório e do número de paradas sofridas por um veículo, em n cruzamentos de uma rede composta por semáforos, o qual, como descrito anteriormente, terá como variáveis os tempos de verde.

Com a obtenção dos tempos de verde para cada cruzamento da rede otimizada, as demais temporizações podem ser obtidas facilmente. Os tempos de ciclo, vermelho total e tempos de amarelo são definidos anteriormente à otimização e os demais tempos, sendo eles os tempos vermelho de ambas as fases, são obtidos por meio do diagrama de tempos, ilustrado na Figura 6.

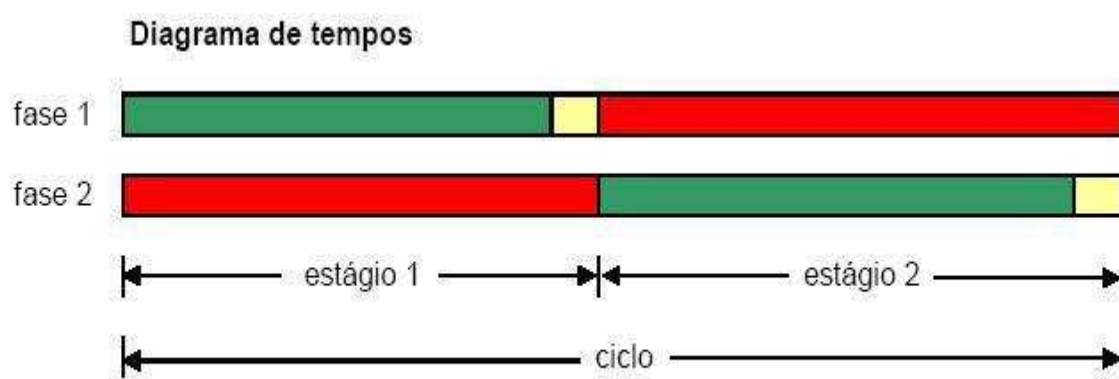


Figura 6: Diagrama de tempos (BRASIL,1988, p. 62).

De forma resumida, pode-se dizer que, no Modelo 1 de otimização proposto, busca calcular o tempo de verde ótimo da aproximação i (g_i) que possibilite minimizar o atraso e o número de paradas sofridas por um veículo em uma rede semaforizada.

No problema, se considera como restrição onde o tempo de verde ótimo (g_i) deve ser maior que o tempo perdido (T_p) e menor que o tamanho do ciclo (C), em segundos.

Assim, de forma genérica, o Modelo 1 de otimização pode ser representado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } ID &= \sum_{i=1}^{n_c} (AU_i + AL_i + KP_i) && \text{(Modelo 1)} \\ \text{Sujeito a} & && \\ & Tp \leq g_i \leq C, \quad i = 1, \dots, n && \end{aligned}$$

onde: T_p : Tempo perdido.

3.2 Modelo 2

Assim como o Modelo 1, o Modelo 2 foi composto por uma expressão que indica o desempenho de uma via semaforizada, onde a composição da função objetivo tem como base a fórmula do tempo de deslocamento de Gobbo (2005, p. 13). A fórmula proposta diferencia-se da desenvolvida por Gobbo por representar o tempo de deslocamento de um veículo, ao passo que a fórmula descrita por Gobbo representa o tempo de todo o fluxo veicular presente na via.

A função que compõe este modelo tem como objetivo quantificar o tempo total de deslocamento de um veículo em uma rede, composta por uma série de cruzamentos, conforme a Equação 24.

$$To = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d}{Vp} + A_v \right) \quad (\text{Equação 24})$$

onde:

To : Tempo total de deslocamento de um veículo em uma rede semaforizada.

n : Número de cruzamentos.

d : Comprimento da via (distância entre semáforos).

Vp : Velocidade esperada de deslocamento do fluxo na aproximação.

$$A_v = \frac{C \cdot (1 - \lambda n_i)^2}{2 \cdot (1 - X_i \cdot \lambda n_i)} + \frac{X_i^2}{4 \cdot (1 - X_i)} : \text{Atraso veicular.}$$

onde:

λn_i : Relação entre o tempo de verde normal e o tempo de ciclo $\left(\frac{g_i}{C} \right)$.

O Modelo 2, assim como o Modelo 1, tem como variáveis os tempos de verde normal. Porém, no Modelo 2 busca-se calcular o tempo de verde ótimo da aproximação i (g_i) que possibilite minimizar o tempo total de deslocamento de um veículo em uma rede semaforizada. Assim, resumidamente, o Modelo 2 pode ser representado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } To = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d}{Vp} + A_v \right) \quad (\text{Modelo 2})$$

Sujeito a

$$Tp \leq g_i \leq C, \quad i = 1, \dots, n$$

A partir da obtenção dos tempos de verde, as demais temporizações são obtidas de acordo com o diagrama de tempos, conforme a Figura 6, descrita anteriormente.

3.3 Implementação computacional dos modelos

Para a obtenção dos tempos de verde que minimizem as funções objetivo, as resoluções dos modelos matemáticos propostos foram efetuadas por um processo matemático de otimização. Os modelos foram implementados em linguagem Fortran, tendo como base um programa desenvolvido por Kripka (2004) para a otimização com o emprego da meta-heurística *Simulated Annealing*.

Para a execução dos programas são necessários os seguintes dados de entrada:

- Modelo 1: fluxo de saturação e fluxo veicular de cada link em cada cruzamento, tempo perdido e tamanho de ciclo. (Modelo 1)
- Modelo 2: além dos dados citados, são necessários o fornecimento do comprimento de cada *link* e a velocidade esperada na via. (Modelo 2)

Ressalta-se que o objetivo da otimização empregando o Modelo 1 consistiu em reduzir o atraso e o número de paradas sofridas por um veículo em uma aproximação, visto que a minimização dos mesmos resulta em melhoras no desempenho de uma via, com a diminuição do tempo de percurso. Já no Modelo 2, o objetivo consistiu em minimizar o tempo total de percurso veicular.

Uma vez definida uma rede, a função objetivo é minimizada para o somatório das n interseções dessa rede, tendo como variáveis os tempos de verde para programação dos semáforos. Um único tempo de verde de cada interseção é considerado como variável independente, visto que o tempo total do ciclo em cada cruzamento é predefinido. Em cada solução possível, os tempos de verde podem assumir apenas valores inteiros (múltiplos de segundo), o que caracteriza o problema como de otimização combinatória.

Os limites inferiores e superiores, que podem ser assumidos pelas variáveis de projeto, são determinados a partir dos valores de tamanho de ciclo e de tempo perdido fornecidos pelo usuário.

Para validação dos modelos, inicialmente foi realizada a otimização de um exemplo teórico disponível na literatura, cujos resultados foram comparados aos resultados obtidos

com o *software* Transyt 7F, também descritos na literatura. Em seguida, foram coletados dados reais referentes à região central da cidade de Passo Fundo e foram realizadas comparações entre os resultados das otimizações obtidos pelos modelos propostos e os dados reais praticados na região considerada. Esses dois testes estão identificados sucessivamente como Estudo Teórico 1 e Estudo Teórico 2, cujos resultados estão apresentados no Capítulo 4, onde se apresenta uma análise comparativa dos mesmos.

Além destas análises, também são apresentadas no Capítulo 4, resultados obtidos de um estudo relacionado ao Modelo 1, para se verificar as influências da variação nos parâmetros do *Simulated Annealing* nos resultados obtidos para o Estudo Teórico 1, e, ainda, de uma análise sobre as influências de variação no tempo de ciclo para o Estudo Teórico 2.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Estudo Teórico 1

No Estudo Teórico 1 foi considerado o exemplo teórico tratado por Beck (1999, p. 67), onde os resultados otimizados pelo Transity 7F foram comparados aos resultados otimizados obtidos inicialmente pela aplicação do Modelo 1 e, posteriormente, pela aplicação do Modelo 2.

O exemplo, citado por Beck (1999, p. 67), trata de uma rede constituída por três cruzamentos semaforizados, com as seguintes características:

- Fluxo de saturação para todas as aproximações da rede de 1800 vph;
- Tempos de ciclo iguais a 80s;
- Tempo de amarelo de 4s;
- Tempo de vermelho total de 2s;
- Tempo perdido de 12s;
- Distância entre os cruzamentos de 400m;
- Velocidade dos veículos de 40 km/h
- Fluxo veicular predominante de 700 vph em sentido horizontal e de 350 vph no sentido vertical, conforme especifica a Figura 7.

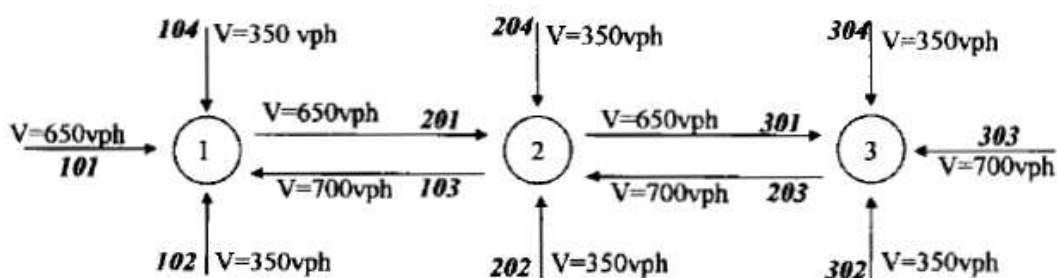


Figura 7: Rede hipotética. (BECK, 1999, p. 67).

Os resultados segundo Beck (1999, p. 67), obtidos por meio de simulações realizadas com o *software* Transyt 7F, estão descritos na Tabela 2, onde a Fase 1 representa o sentido longitudinal (horizontal) e a Fase 2, o sentido transversal (vertical) do tráfego.

Tabela 2: Dados otimizados pelo Transyt 7F.

Comprimento do intervalo (s)						
Fase 1			Fase 2			
Verde		Amarelo	Vermelho Total	Verde	Amarelo	Vermelho Total
Interseção 1	43	4	2	25	4	2
Interseção 2	43	4	2	25	4	2
Interseção 3	44	4	2	24	4	2

Fonte: BECK (1999, p. 67).

Considerando os dados do trânsito obtidos no exemplo exposto por Beck (1999), a etapa seguinte consistiu na utilização do Modelo 1, onde para otimizar essa rede foram necessários alguns dados de entrada do trânsito, entre eles: o número de cruzamentos, o fluxo de saturação, fluxo veicular de cada fase desses cruzamentos e o tamanho do ciclo, que neste modelo foi considerado sempre constante para toda a rede.

Visando comparar os resultados obtidos no presente estudo pela aplicação do Modelo 1, em relação aos obtidos pelo Transyt 7F, para determinar a influência que o fator de penalidade do número de paradas (K) exerce nos resultados, foram feitas simulações, otimizações e comparações, com variações para K entre 10 e 60, considerados de 10 em 10 unidades, intervalo recomendado pela literatura estudada (GOBBO, 2005). Os resultados estão expostos na Tabela 3.

De acordo com os resultados obtidos com o Modelo 1, observa-se que, à medida que K aumenta, apresentam-se variações de 1s para mais na Fase 1, com consequente redução de 1s na Fase 2.

Também se observa que o valor de $K = 20$ proporciona temporizações iguais nas duas primeiras interseções, às obtidas pelo Transyt 7.

Tabela 3: Comparação entre resultados obtidos pelo Transyt 7F em relação aos obtidos pelo Modelo 1, com variações de K , de 10 em 10 unidades

		Comprimento do intervalo (s)					
		Fase 1			Fase 2		
		Verde	Amarelo	Vermelho Total	Verde	Amarelo	Vermelho Total
TRANSYT 7F	Interseção 1	43	4	2	25	4	2
	Interseção 2	43	4	2	25	4	2
	Interseção 3	44	4	2	24	4	2
MODELO 1 com $K = 10$	Interseção 1	42	4	2	26	4	2
	Interseção 2	42	4	2	26	4	2
	Interseção 3	42	4	2	26	4	2
MODELO 1 com $K = 20$	Interseção 1	43	4	2	25	4	2
	Interseção 2	43	4	2	25	4	2
	Interseção 3	43	4	2	25	4	2
MODELO 1 com $K = 30$	Interseção 1	44	4	2	24	4	2
	Interseção 2	44	4	2	24	4	2
	Interseção 3	44	4	2	24	4	2
MODELO 1 com $K = 40$	Interseção 1	45	4	2	23	4	2
	Interseção 2	45	4	2	23	4	2
	Interseção 3	45	4	2	23	4	2
MODELO 1 com $K = 50$	Interseção 1	46	4	2	22	4	2
	Interseção 2	46	4	2	22	4	2
	Interseção 3	46	4	2	22	4	2
MODELO 1 com $K = 60$	Interseção 1	47	4	2	21	4	2
	Interseção 2	47	4	2	21	4	2
	Interseção 3	47	4	2	21	4	2

Além disso, outras análises foram realizadas em relação aos resultados obtidos com os diferentes valores de K . Também foram comparados o grau de saturação (X) e o atraso uniforme (AU), entre as variações ocorridas. Essas medidas são os principais indicativos de desempenho em condições reais, em uma aproximação.

A Tabela 4 apresenta os graus de saturação (X) com os diferentes valores de K em ambas as fases.

Tabela 4: Graus de saturação, proporcionados pelos diferentes valores de K .

	X da Fase 1	X da Fase 2
$K = 10$	0,741	0,598
$K = 20$	0,724	0,622
$K = 30$	0,707	0,648
$K = 40$	0,691	0,676
$K = 50$	0,676	0,707
$K = 60$	0,662	0,741

Para verificar se a variabilidade entre os graus de saturação pode ou não ser considerada significativa também foram empregadas medidas estatísticas de variabilidade, que neste caso são o desvio-padrão (σ) e coeficiente de variação (CV).

Conforme McClave (2009, p.67), “para achar uma medida significativa de variabilidade de dados, deve-se calcular o desvio-padrão do conjunto de dados”, o qual, para o mesmo autor, pode ser expresso pela Equação 25.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_e}} \quad (\text{Equação 25})$$

onde:

σ : Desvio-padrão.

x_i : Valor individual de cada elemento.

\bar{x} : Média aritmética dos elementos.

n_e : Número de elementos.

. Para reforçar as conclusões obtidas a respeito de variabilidade de dados, outra medida importante a ser considerada é o coeficiente de variação, que, segundo Amaral, Muniz e Souza (1997, p.1), é “o coeficiente de variação definido como o desvio-padrão em porcentagem da média, é a medida estatística mais utilizada pelos pesquisadores na avaliação da precisão dos experimentos”. O coeficiente de variação, ainda conforme estes autores é dado pela Equação 26.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} .100 \quad (\text{Equação 26})$$

onde:

CV : Coeficiente de variação;

σ : Desvio-padrão;

De acordo com os conceitos descritos, obteve-se como desvio-padrão em relação aos graus de saturação das Fases 1 e 2 os seguintes resultados:

Desvio-padrão da Fase 1: $\sigma = 0,027$

Desvio-padrão da Fase 2: $\sigma = 0,049$

Como pode ser observado, são baixos os valores dos desvios-padrão de ambas as fases, evidenciando que a variabilidade do fator de penalidade do número de paradas, no exemplo em questão, não causa diferenças significativas nos resultados do grau de saturação. Já aplicando o coeficiente de variação, obteve-se:

Coeficiente de variação da Fase 1: $CV = 7,33\%$

Coeficiente de variação da Fase 2: $CV = 3,87\%$

Pode-se observar que os resultados confirmam a baixa variabilidade entre os graus de saturação de ambas as fases, fato que reforça a indicação de que as mudanças do valor de K no Modelo 1 não proporcionam mudanças significantes nos graus de saturação.

Em relação às comparações quanto ao atraso uniforme entre as temporizações obtidas, que, tratando-se dos indicativos que compõem a função objetivo, é o de maior relevância, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5

Tabela 5: Atraso Uniforme (AU), em segundos, com variações de 10 em 10 unidades, no valor de K

	AU da Fase 1	AU da Fase 2	Total
$K = 10$	13,29	20,36	33,35
$K = 20$	12,60	21,12	33,72
$K = 30$	11,92	21,89	33,82
$K = 40$	11,27	22,68	33,96
$K = 50$	10,64	23,49	34,13
$K = 60$	10,02	24,30	34,33

Analisando as variabilidades dos atrasos uniformes nas Fases 1 e 2 através do desvio-padrão e coeficiente de variação, tem-se:

Desvio-padrão entre os atrasos da fase 1: $\sigma = 0,62$ s

Desvio-padrão entre os atrasos da fase 2: $\sigma = 0,69$ s

Trata-se de valores de baixa significância, pois representam uma variabilidade em relação à média dos atrasos inferior a 1s. Assim, como no caso anterior, para reforçar essa conclusão foi usado o coeficiente de variação para ambas as fases.

Coeficiente de variação da fase 1: $CV = 4,42\%$

Coeficiente de variação da fase 2: $CV = 2,94\%$

Logo, conclui-se que, por possuírem um baixo percentual de variabilidade, o valor de K não influencia, significativamente, no atraso uniforme.

Finalizada a análise inicial do Modelo 1, a próxima etapa da pesquisa foi a análise do Modelo 2, para o qual, assim como no Modelo 1, também foram feitas simulações com os dados do trânsito do exemplo anterior, comparando os resultados otimizados com os obtidos pelo *software* Transyt 7F.

Na execução do programa fez-se necessário fornecer dados de entrada, os quais foram descritos na seguinte ordem: número de cruzamentos, fluxo de saturação, comprimento da via, velocidade esperada da via, fluxo veicular e o tamanho do ciclo, o qual será sempre constante para toda a rede.

Os resultados dos tempos semafóricos otimizados pelo Modelo 2 estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6: Tempos semafóricos, em segundos, otimizados pelo Modelo 2.

Comprimento do intervalo (s)						
Fase 1				Fase 2		
Verde		Amarelo	Vermelho Total	Verde	Amarelo	Vermelho Total
Interseção 1	42	4	2	26	4	2
Interseção 2	42	4	2	26	4	2
Interseção 3	42	4	2	26	4	2

De acordo com os resultados obtidos, com a otimização realizada pelo Modelo 2, observa-se que os resultados diferem em 1s para menos na Fase 1 e 1s para mais na Fase 2, em relação à otimização feita pelo Transyt 7F.

Além disso, quando são comparados os resultados obtidos pelo Modelo 1 e pelo Modelo 2, quando o Modelo 1 é otimizado com o fator de penalidade do número de paradas igual a 10, pode-se observar que ambos possuem igualdade de resultados.

4.1.2 Estudo da variação nos parâmetros do *Simulated Annealing* para o Modelo 1

Com o intuito de verificar as influências na temporização semafórica que as variações nos parâmetros do *Simulated Annealing* podem proporcionar nos resultados otimizados pelo Modelo 1, através do estudo Teórico 1, fez-se necessário realizar

simulações com mudanças nos parâmetros temperatura inicial (T_0), fator de redução da temperatura (α) e tempo de verde inicial (t_v).

A temperatura inicial (T_0) alta proporciona uma chance maior de se escapar de mínimos locais, pois são aceitos mais pontos nas vizinhanças da solução considerada. No entanto, à medida que T se aproxima de zero, o algoritmo comporta-se como um método de descida, uma vez que diminui a probabilidade de se aceitarem movimentos que possam piorar a solução encontrada.

O fator de redução da temperatura (α) faz com que a temperatura se reduza gradativamente, influenciando no número de iterações obtidas pelo método. Como critério de parada, definiu-se que temperatura final deve ser de no máximo um milésimo da temperatura inicial. Por sua vez, o tempo de verde inicial (t_v), assim como os parâmetros acima, pode influenciar no número de cálculos da função, ou seja, todos esses são parâmetros de controle do método. Além disso, é interessante que a convergência para uma mesma solução ocorra para solução inicial adotada, de modo a tornar o processo menos dependente de um conhecimento prévio acerca do problema abordado.

Para essa simulação, o fator de penalidade do número de paradas (K) foi de vinte unidades para o modelo.

Otimizando a rede do exemplo em questão pelo Modelo 1, com os valores de temperatura inicial (T_0) num intervalo de 10 a 130, variando de 20 em 20 unidades, não ocorreram alterações nos tempos semafóricos, permanecendo os mesmos tempos da Tabela 3. Também não ocorreram mudanças no número de iterações, visto que em todas as simulações ocorreram 205.801 iterações.

Cabe enfatizar que, apesar do número de iterações ser bastante alto, o tempo de execução do software é muito baixo (em torno de 4 segundos), tornando pouco relevante, em termos práticos, um esforço na redução desse tempo. Para as análises foi empregado um microcomputador com processador Pentium de 2.1 GHz, 3 GB de RAM e 250 GB de HDD.

Para análise da influência do valor do fator de redução da temperatura (α) foram utilizados os valores 0,90; 0,95; 0,97; 0,98 e 0,99, avaliando-se quais mudanças ocorreram nas temporizações e no número de iterações. Esses dados são expostos na Tabela 7.

Tabela 7: Tempos semafóricos, em segundos, e número de iterações, com diferentes valores do fator de redução da temperatura (α)

		Fase 1	Fase 2	Número de iterações
α		Verde	Verde	
0,90	Interseção 1	43	25	40.201
	Interseção 2	43	25	
	Interseção 3	43	25	
0,95	Interseção 1	43	25	81.601
	Interseção 2	43	25	
	Interseção 3	43	25	
0,96	Interseção 1	43	25	102.601
	Interseção 2	43	25	
	Interseção 3	44	24	
0,97	Interseção 1	43	23	136.801
	Interseção 2	43	23	
	Interseção 3	43	23	
0,98	Interseção 1	43	23	205.801
	Interseção 2	43	23	
	Interseção 3	43	23	
0,99	Interseção 1	43	23	413.401
	Interseção 2	43	23	
	Interseção 3	43	23	

Como pode ser observado, houve apenas um variação de 1s no tempo de verde na terceira interseção, quando o fator de redução foi de 0,96. Já o número de iterações teve uma alteração significativa, com um aumento expressivo do número de iterações à medida que o fator de redução foi aumentando.

Para o tempo de verde inicial (t_v) foram utilizados valores de 10 a 45s, com uma variação de 5 em 5s, porém essa variabilidade de valores não proporcionou nenhuma

alteração na temporização semafórica e no número de iterações, sugerindo, desta forma, que a solução obtida deve consistir num ótimo global para o problema.

4.2 Estudo Teórico 2

O Estudo Teórico 2 corresponde à otimização realizada em uma rede semaforizada da região central da cidade de Passo Fundo, RS. Essa simulação, assim como no Estudo Teórico 1, tem como finalidade a obtenção de tempos de verde otimizados para os semáforos dos cruzamentos pertencentes à rede.

A cidade de Passo Fundo está contida no município de Passo Fundo, o qual é considerado um polo de desenvolvimento socioeconômico e cultural do estado do Rio Grande do Sul. Tem localização privilegiada dentro do Mercosul, no centro dos eixos econômicos de Buenos Aires, Montevideu e São Paulo – Rio de Janeiro, permitindo um rápido acesso às capitais do sul do Brasil e países vizinhos. (MELO e ROMANINI, 2007, p. 4).

Possui como características físicas: latitude de 28° 3' sul, longitude de 52° 4' oeste, área aproximada de 758,27 km², população aproximada de 184.869 habitantes (censo 2010-IBGE), o que a classificando como cidade de médio porte, pois segundo Amorim Filho e Arruda (2001, P. 4), “cidades de médio porte é o conjunto de municípios com população urbana entre 100 mil e 500 mil habitantes”. A frota veicular, incluindo motocicletas é de 77.370 (IBGE 2010).

Atualmente, Passo Fundo se destaca, na região, como polo cultural e de saúde, dispondo de uma rede hospitalar considerada como referência em todo o estado. Na área de educação conta com uma universidade comunitária regional, a Universidade de Passo Fundo (UPF), e também algumas faculdades isoladas. Além disso, possui um comércio expressivo mantendo a fama de cidade hospitaleira, oferecendo uma das melhores redes hoteleiras do Rio Grande do Sul e uma gastronomia diversificada. (MELO e ROMANINI, 2007).

As características descritas fazem de Passo Fundo uma cidade com alto fluxo veicular, onde nos últimos anos tornou-se rotineira a ocorrência de engarrafamentos, formações de filas e demais problemas consequentes dessa situação.

Para a definição da rede selecionada para a otimização foi considerado o alto fluxo de veículos na região, sendo esta rede composta por cruzamentos semaforizados, definida pelos seguintes cruzamentos e vias: cruzamento da av. Sete de Setembro com a av. Brasil, cruzamento da rua Cel. Chicuta com a av. Brasil, cruzamento da av. Bento Gonçalves com a av. Brasil e cruzamento da rua Fagundes dos Reis com a av. Brasil.

Para melhor caracterização desta área pode ser observado o mapa apresentado na Figura 8.

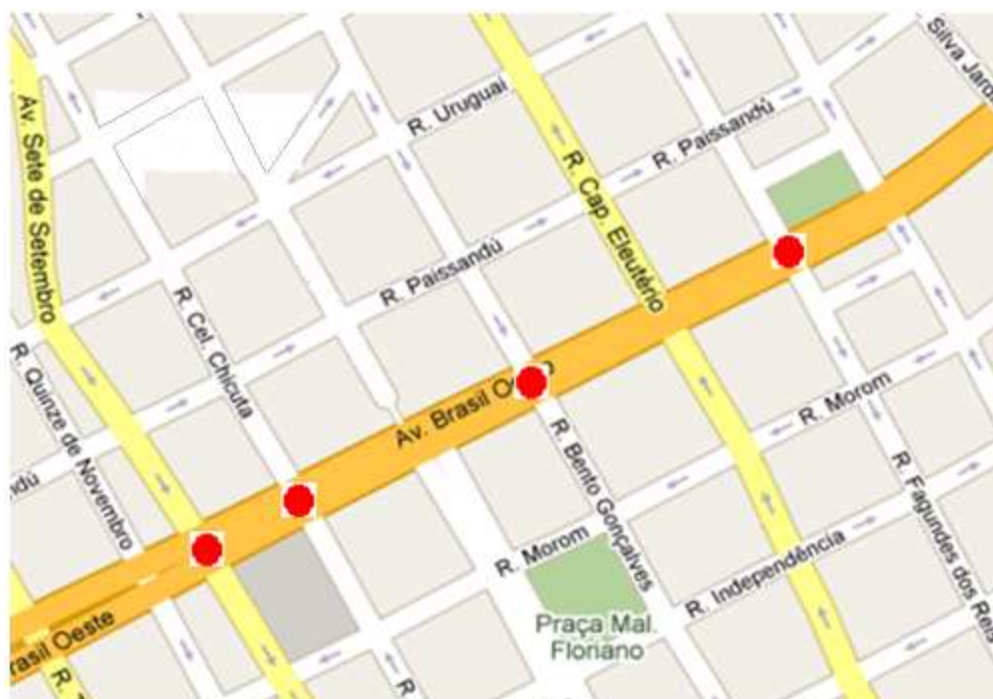


Figura 8: Mapa da região selecionada para aplicação dos modelos.

(GOOGLE MAPS, 2010).

Após a escolha da rede na qual foram aplicados os processos de otimização através dos modelos construídos, a próxima etapa foi a obtenção dos dados de trânsito referentes à região escolhida, os quais serviram como parâmetros de entrada para resolução computacional dos modelos, bem como se obtiveram os valores necessários para se determinarem as medidas de desempenho da rede.

Dessa forma, foi feito um levantamento de dados referentes ao trânsito da região selecionada, os quais se constituem em: fluxo de saturação, fluxo veicular, distância das vias pertencentes aos cruzamentos, velocidade esperada para via e temporização atual dos semáforos.

O fluxo de saturação, fluxo veicular, distância das vias pertencentes aos cruzamentos e temporização atual dos semáforos foram obtidos através de dados fornecidos pelo departamento de trânsito da Prefeitura Municipal de Passo Fundo. Quanto à velocidade esperada para via, esta foi definida pelo autor, levando em conta as características e condições da trafegabilidade da via. Assim, para esta rede, a velocidade esperada para a via, levando em conta a segurança e condições de trafegabilidade, foi de 50 km/h para a av. Brasil e de 40 km/h para as vias transversais.

Os fluxos de saturação e veicular das vias pertencentes a essa rede estão expostos na Tabela 8, onde a Fase 1 é composta pela av. Brasil e a Fase 2, pela vias transversais, as quais são: av. Sete de Setembro e ruas Cel. Chicuta, Bento Gonçalves e Fagundes dos Reis.

Tabela 8: Fluxo de saturação e fluxo veicular, em veículos por hora de tempo verde, nas vias da rede selecionada para a otimização.

Fase 1		Fase 2		
Cruzamentos	Fluxo de saturação	Fluxo veicular	Fluxo de saturação	Fluxo veicular
Av. Brasil x av. Sete de Setembro	2637	1397	3945	998
Av. Brasil x Cel. Chicuta	2637	1201	3965	1352
Av. Brasil x Bento Gonçalves	2550	1495	2820	642
Av. Brasil x Fagundes dos Reis	2637	1655	4183	976

Fonte: SD Consultoria e Engenharia Ltda.

Os comprimentos das vias pertencentes aos cruzamentos foram obtidos por meio de recursos do GOOGLE MAPS (2010), conforme ilustrado pela Figura 9, com os quais foi possível construir a Tabela 9.

O tempo de ciclo para essa simulação inicialmente se manteve o mesmo que o da programação atual, que corresponde a 84s para todos os cruzamentos.



Figura 9: Mapa com os comprimentos das ruas da região que foi otimizada.

(GOOGLE MAPS, 2010).

Tabela 9: Comprimento das vias, em metros, do percurso no qual foi realizada a otimização.

Cruzamentos				
Ruas	1	2	3	4
Av. Brasil	62	100	260	280
Ruas Transversais	130	150	130	140

Fonte: GOOGLE MAPS, 2010.

Os tempos semafóricos atuais dos cruzamentos da região estudada estão expostos na Tabela 10, onde cada tempo e vias são definidos pelas seguintes siglas:

- T_p é o tempo perdido;
- A_m é o tempo de amarelo;
- Ver é o tempo de vermelho;
- vt é o tempo de vermelho total;
- g é o tempo de verde;
- C é o tempo de ciclo;
- av é a Avenida Brasil e
- $tran$, as demais vias transversais.

Tabela 10: Tempos semafóricos atuais, em segundos, do percurso a ser otimizado.

Cruzamento	Tp	VT	g_{av}	Ver_{av}	Am_{tran}	VT	g_{tran}	Ver_{tran}	am_{tran}	vt	VT	C
1	19	1	40	28	3	1	25	43	3	1	10	84
2	19	1	40	28	3	1	25	43	3	1	10	84
3	19	1	40	28	3	1	25	43	3	1	10	84
4	19	1	40	28	3	1	25	43	3	1	10	84

Fonte: SD Consultoria e Engenharia Ltda.

4.2.1 Critérios de avaliação de resultados

Para avaliação dos resultados foram calculadas medidas teóricas de desempenho da região estudada, antes e após a otimização, as quais são: o grau de saturação de cada fase, o atraso uniforme por cruzamento e a média de veículos retidos após o término do tempo de verde, por ciclo, conforme apresentado a seguir. Esta última medida foi analisada em apenas em um cruzamento, o da avenida Brasil com a rua Coronel Chicuta, escolha realizada em razão da maior demanda de veículos dentre os cruzamentos analisados.

Para a obtenção da média de veículos retidos após o término do tempo de verde, é necessário obter a média entre a quantidade de veículos que chegam e param durante o tempo de vermelho (estes denominados, neste trabalho, como veículos em espera) e a quantidade de veículos que passam durante o tempo de verde. Assim, a quantidade de veículos retidos corresponde à diferença entre os dois.

Na busca da quantificação das medidas relatadas acima foi realizada uma pesquisa de campo, na qual um grupo de seis pessoas coletou dez amostras do número de veículos em espera durante o tempo de vermelho e do número de veículos que passam durante o tempo de verde. As amostras foram obtidas pela contagem de veículos e foram realizadas em dois dias, nos intervalos entre 11 e 12h e entre 18 e 19h. A primeira foi coletada em uma sexta-feira, dia 8 de abril de 2011, e a outra ocorreu em uma segunda-feira, dia 11 de abril de 2011. Justifica-se a escolha desses horários por serem os de maior fluxo veicular, segundo informações de técnicos da Prefeitura Municipal. As amostras obtidas pela contagem de veículos estão relacionadas na Tabela 11.

Tabela 11: Amostra coletada em campo, de veículos em espera e de veículos que passam a aproximação.

Dias e horários	Av. Brasil			Cel. Chicuta	
	Amostras	Veículos em espera	Veículos que passam	Veículos em espera	Veículos que passam
Segunda- feira das 11h às 12h	1	13	13	20	23
	2	6	18	22	26
	3	10	18	20	25
	4	7	19	27	29
	5	10	19	29	30
	6	8	23	26	27
	7	9	25	18	21
	8	13	26	31	32
	9	13	21	20	18
	10	12	22	30	29
Total		101	204	243	260
Segunda-feira das 18h às 19h	1	10	22	41	28
	2	13	29	37	24
	3	9	25	46	31
	4	8	18	49	29
	5	8	29	45	26
	6	7	22	44	32
	7	11	26	53	30
	8	11	20	54	34
	9	12	28	54	36
	10	8	20	51	26
Total		97	239	474	296
Sexta-feira das 11h às 12h	1	10	15	32	28
	2	16	23	30	25
	3	6	18	15	20
	4	12	22	27	30
	5	6	16	20	28
	6	10	25	24	28
	7	8	20	23	24
	8	10	33	24	25
	9	6	22	22	26
	10	17	27	28	27
Total		100	221	245	262
Sexta- feira das 18h às 19h	1	12	25	31	33
	2	10	29	29	27
	3	11	27	31	27
	4	17	38	24	27
	5	9	28	29	25
	6	16	35	33	32
	7	8	22	30	30
	8	14	33	35	28
	9	9	27	31	26
	10	11	22	36	30
Total		117	286	309	285

Com os valores obtidos com as dez amostras em ambos os horários e dias, obtiveram-se os valores médios de veículos em espera e de veículos que passam a aproximação, os quais podem ser visualizados na Tabela 12.

Considerando os veículos que passam a aproximação durante o tempo de verde e levando em conta que o tempo de verde atual da avenida Brasil é de 40s e o tempo de verde da rua Coronel Chicuta é de 25s, tem-se um fluxo de saturação médio (S) (veículos que passam a aproximação por segundo de tempo verde) na segunda-feira e na sexta-feira, em ambos os horários, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 12: Média de veículos em espera e que passam a aproximação, por ciclo.

Dias	Horário	Av. Brasil		R. Cel. Chicuta	
		$\bar{X}_{e e}$	\bar{X}_p	$\bar{X}_{e e}$	\bar{X}_p
Segunda	11h às 12h	10,10	20,40	24,30	28,00
	18h às 19h	9,70	23,90	47,40	29,60
Sexta	11h às 12h	10,10	22,10	24,50	26,10
	18h às 19h	16,11	28,60	30,90	28,50

Tabela 13: Fluxo de saturação, veículos por segundo.

Horário	Segunda-feira		Sexta-feira	
	$S_{Avenida}$ (V/seg)	$S_{Cel.Chicuta}$ (V/seg)	$S_{Avenida}$ (V/seg)	$S_{Cel.Chicuta}$ (V/seg)
11h às 12h	0,510	1,040	0,552	0,652
18h às 19h	0,597	1,076	0,715	1,236

Para análise e comparação de resultados antes e após a otimização, fez-se necessário obter medidas de desempenho da situação atual do trânsito, conforme apresentado a seguir.

a) Medidas de desempenho obtidas antes da aplicação dos modelos

Inicialmente, foram obtidos os indicativos de desempenho: grau de saturação por fase e atraso uniforme por cruzamento de cada aproximação da região selecionada, sendo o

grau de saturação obtido pela Equação 6 e o atraso uniforme obtido pela Equação 21, ambas descritas anteriormente. Esses dados estão dispostos nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Graus de saturação (X), adimensional.

Cruzamentos	1		2		3		4	
	Av. Brasil	Sete de Setembro	Av. Brasil	Cel. Chicuta	Av. Brasil	Bento Gonçalves	Av. Brasil	Fagundes dos Reis
X	1,11	0,85	0,95	1,15	1,23	0,76	1,32	0,78

Tabela 15: Atraso uniforme (AU), em segundos, por cruzamento.

Cruzamentos				
	Av. Brasil x Sete de Setembro	Av. Brasil x Cel. Chicuta	Av. Brasil x Bento Gonçalves	Av. Brasil x Fagundes dos Reis
AU	52,24	52,60	54,68	57,97

Com a obtenção desses indicativos, a próxima etapa foi a obtenção do número de veículos retidos no cruzamento após o tempo de verde. Tais valores foram obtidos conforme a metodologia relatada anteriormente, os quais estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Número de veículos retidos no cruzamento após o tempo de verde.

Dias	Horário	Av. Brasil	R. Coronel Chicuta
		\bar{x}_r	\bar{x}_r
Segunda	11h às 12h	0	0
	18h às 19h	0	17,80
Sexta	11h às 12h	0	0
	18h às 19h	0	2,4

Após a obtenção destes dados, a próxima etapa da pesquisa foi a otimização dos dados por meio dos modelos propostos.

b) Temporizações semaforicas, obtidas com as otimizações realizadas pelos modelos analisados

Com o objetivo de se obterem novos planos semaforicos otimizados, foi efetuada a resolução por meio dos dois modelos analisados.

Inicialmente, foram realizadas otimizações por meio do Modelo 1. Assim como no Estudo Teórico 1, neste estudo de caso foram feitas otimizações com variações do fator de penalidade do número de parada (K) de 10 em 10 unidades, em um intervalo de 10 a 60.

Para o exemplo específico, os tempos permaneceram os mesmos para todos os casos, com os diferentes valores do K .

As temporizações obtidas pelo Modelo 1 estão expostas na Tabela 17, onde o cruzamento 1 é composto pela av. Brasil com a av. Sete de Setembro; o cruzamento 2, pela av. Brasil com a Cel. Chicuta; o cruzamento 3, pela av. Brasil com a Bento Gonçalves e o cruzamento 4, pela av. Brasil com a Fagundes dos Reis.

Tabela 17: Tempos semaforicos, em segundos, otimizados pelo Modelo 1.

Cruzamento	Tp	g_{av}	ver_{av}	Am_{tran}	vt	g_{tran}	Ver_{tran}	am_{tran}	VT	VT	C
1	19	44	24	4	1	21	48	3	1	10	84
2	19	37	31	4	1	28	41	3	1	10	84
3	19	46	22	4	1	19	50	3	1	10	84
4	19	45	23	4	1	20	49	3	1	10	84

Após os dados obtidos pela otimização com o Modelo 1, também foi realizada a otimização com o Modelo 2, onde obteve-se os mesmos tempos apresentados para o Modelo 1, apresentados na Tabela 17.

Em seguida, considerando os dados da Tabela 18, comparando os resultados obtidos com a otimização dos modelos e os tempos atuais, observa-se que, de acordo com os resultados da otimização, obteve-se um aumento de 4 a 6s no tempo de verde para a av. Brasil nos cruzamentos 1, 3 e 4. Já no cruzamento 2 houve um aumento de 3s para o tempo de verde da rua Cel. Chicuta, tempos esses que equivalem a uma variação de 10% a 15% nas temporizações.

Tabela 18: Tempos semafórico, em segundos, atuais e otimizados.

	Cruzamentos	T_p	g_{av}	ver_{av}	g_{tran}	Ver_{tran}	C
ATUAIS	1	19	40	28	25	43	84
	2	19	40	28	25	43	84
	3	19	40	28	25	43	84
	4	19	40	28	25	43	84
OTIMIZADOS	1	19	44	24	21	48	84
	2	19	37	31	28	41	84
	3	19	46	22	19	50	84
	4	19	45	23	20	49	84

Visando comparar se ocorreriam melhoras com a implementação dos tempos sugeridos pelos modelos em relação aos tempos atuais, também foi realizada uma análise dos indicativos de desempenho da região após a otimização.

c) Medidas de desempenho obtidas após a aplicação dos modelos

Uma vez obtidos os resultados das temporizações após o processo de otimização, a próxima etapa consistiu na obtenção das medidas de desempenho das vias, caso esses tempos fossem implementados.

Cabe enfatizar que, como para este exemplo não houve distinção entre os resultados das otimizações dos modelos, o emprego das temporizações independeria do modelo a ser utilizado.

Os indicativos de desempenho definidos para esta análise foram o grau de saturação, atraso uniforme e o número de veículos retidos após o tempo de verde, sendo o grau de saturação e o atraso uniforme, obtidos, como descritos anteriormente, através das Equações 6 e 21 e o número de veículos retidos, obtidos conforme a metodologia relatada anteriormente.

O indicativo de desempenho grau de saturação está apresentado na Tabela 19.

Tabela 19: Graus de saturação (X).

Cruzamentos	1		2		3		4	
Aproximações	Av. Brasil	Av. Sete de Setembro	Av. Brasil	Cel. Chicuta	Av. Brasil	Bento Gonçalves	Av. Brasil	Fagundes dos Reis
X	1,01	1,01	1,03	1,02	1,07	1,01	1,17	0,98

Diante dos resultados, observa-se que ocorreriam melhoras no grau de saturação nas vias, principalmente nos superiores a 1, tendo em vista que o grau de saturação superior a 1 significa a formação de fila. Porém, para o tamanho de ciclo e de tempo perdido atuais, isso não foi possível.

Outra vantagem que pode ser observada nos valores do grau de saturação correspondentes à solução otimizada é que tendem a ficar equilibrados entre as fases de cada cruzamento, proporcionando, assim, igualdade de condições de trafegabilidade em ambos os sentidos. Esses resultados podem ser observados na Tabela 20 e no gráfico da Figura 10.

Tabela 20: Graus de saturação (X), com tempos semafóricos atuais e otimizados.

Cruzamentos	1		2		3		4	
Aproximações	Av. Brasil	Sete de Setembro	Av. Brasil	Cor. Chicuta	Av. Brasil	Bento Gonçalves	Av. Brasil	Fagundes dos Reis
ATUAIS	1,11	0,85	0,95	1,15	1,23	0,76	1,32	0,78
OTIMIZADOS	1,01	1,01	1,03	1,02	1,07	1,01	1,17	0,98

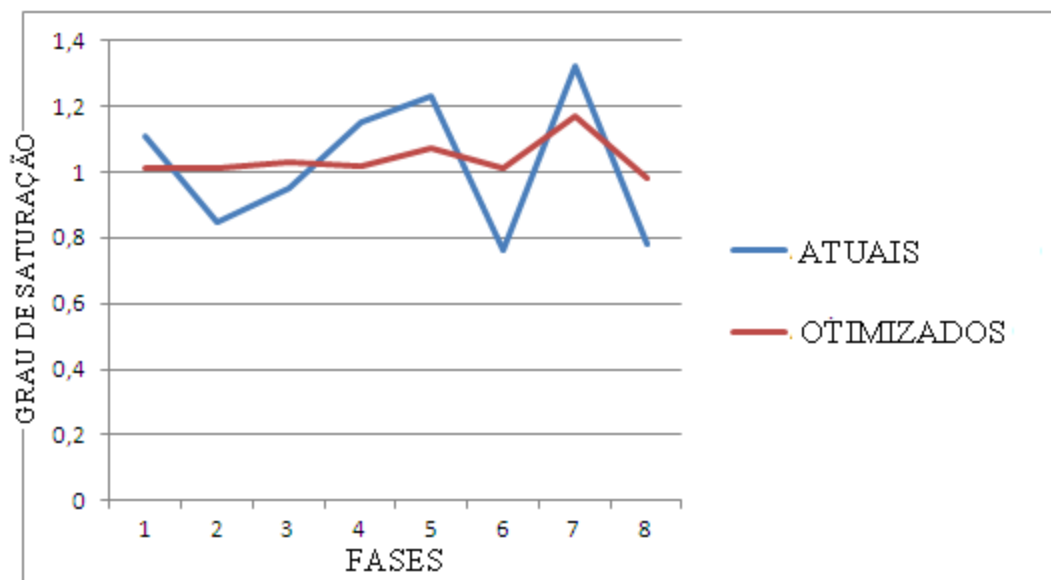


Figura 10: Gráfico dos graus de saturação, com tempos semafóricos atuais e otimizados.

Para o atraso uniforme obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Atraso uniforme (AU), em segundos, por cruzamento.

Cruzamentos				
	Av. Brasil x Av. Sete de Setembro	Av. Brasil x Cel. Chicuta	Av. Brasil x Bento Gonçalves	Av. Brasil x Fagundes dos Reis
AU	51,88	52,47	53,34	56,11

Analisando o atraso uniforme, evidencia-se uma redução de tempo em cada cruzamento, visto que, somando-se os atrasos em ambos, obtém-se uma redução de 3,11s no atraso da rede otimizada em relação a não otimizada. Apesar de o ganho ter sido em pequena escala, houve melhoras, visto que esse atraso é por veículo que trafega nesta via. A Tabela 22 e o gráfico da Figura 11 apresentam dados referentes à situação descrita.

Tabela 22: Atraso uniforme (AU) por cruzamento, em segundos, com tempos semafóricos atuais e otimizados.

Cruzamentos				
	Av. Brasil x Sete de Setembro	Av. Brasil x Cel. Chicuta	Av. Brasil x Bento Gonçalves	Av. Brasil x Fagundes dos Reis
ATUAIS	52,24	52,60	54,68	57,97
OTIMIZADOS	51,88	52,47	53,34	56,11

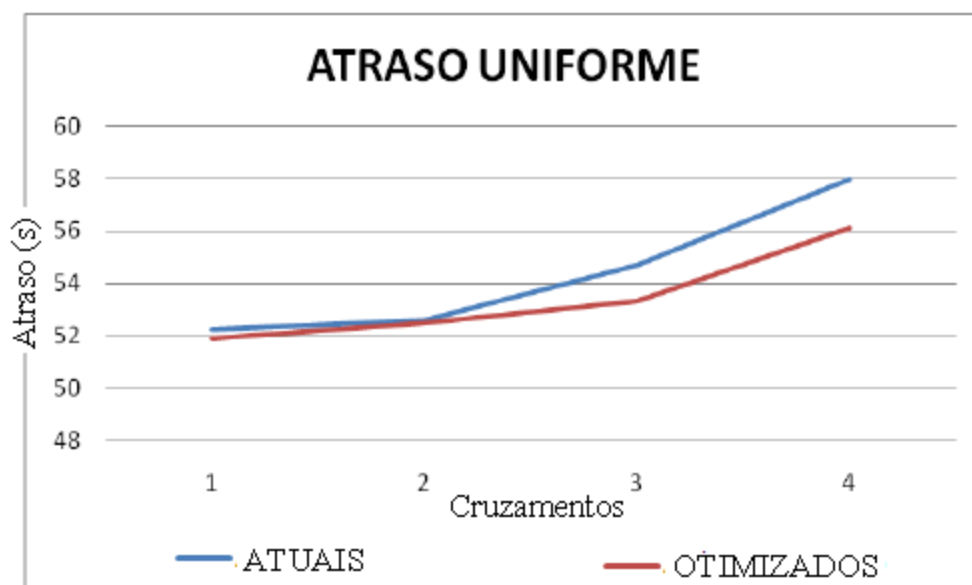


Figura 11: Representação gráfica dos atrasos uniformes, com os tempos semafóricos atuais e otimizados (em segundos).

Para se obter o número de veículos retidos no semáforo selecionado após a otimização, foi utilizada a seguinte metodologia: através das amostras, foram determinados os fluxos de saturação médios dos semáforos em questão, de acordo com a Tabela 14, e com a nova temporização tem-se uma nova quantidade média de veículos que passam o cruzamento durante o tempo de verde em ambos os dias e horários considerados (ver Tabela 23).

Tabela 23: Média de veículos em espera e veículos que passam a aproximação, por ciclo, com as temporizações otimizadas.

Dias	Horário	Av. Brasil		R. Cel. Chicuta	
		$\bar{X}_{e e}$	\bar{X}_p	$\bar{X}_{e e}$	\bar{X}_p
Segunda	11h às 12h	10,10	18,87	24,30	29,12
	18h às 19h	9,7	22,11	47,40	33,15
Sexta	11h às 12h	10,10	20,44	24,50	29,12
	18h às 19h	16,11	26,45	30,90	31,92

Considerando os dados da Tabela 23, obteve-se o número de veículos retidos após a otimização, conforme apresentado na Tabela 24. Como se pode observar, nos horários em

que não existiam veículos retidos, o trânsito permaneceu sem retenção. Já, nos horários em que ocorria retenção de veículos, houve uma redução significativa nessa retenção, sendo 3,55 veículos na segunda-feira, no horário das 18h às 19h e, na sexta-feira, com a otimização, no horário das 18h às 19h nenhum veículo ficou retido. Esses dados estão detalhados na Tabela 25 e no gráfico da Figura 12.

Tabela 24: Número de veículos retidos no cruzamento após o tempo de verde.

Dias	Horário	Av. Brasil	R. Coronel Chicuta
		\bar{x}_r	\bar{x}_r
Segunda	11h às 12h	0	0
	18h às 19h	0	14,25
Sexta	11h às 12h	0	0
	18h às 19h	0	0

Tabela 25: Número de veículos retidos, com temporizações atuais e otimizadas, ao término de tempo de verde.

Dias	Horário	Av. Brasil		R. Coronel Chicuta	
		\bar{x}_r		\bar{x}_r	
		Atuais	Otimizadas	Atuais	Otimizadas
Segunda	11h às 12h	0	0	0	0
	18h às 19h	0	0	17,80	14,25
Sexta	11h às 12h	0	0	0	0
	18h às 19h	0	0	2,4	0

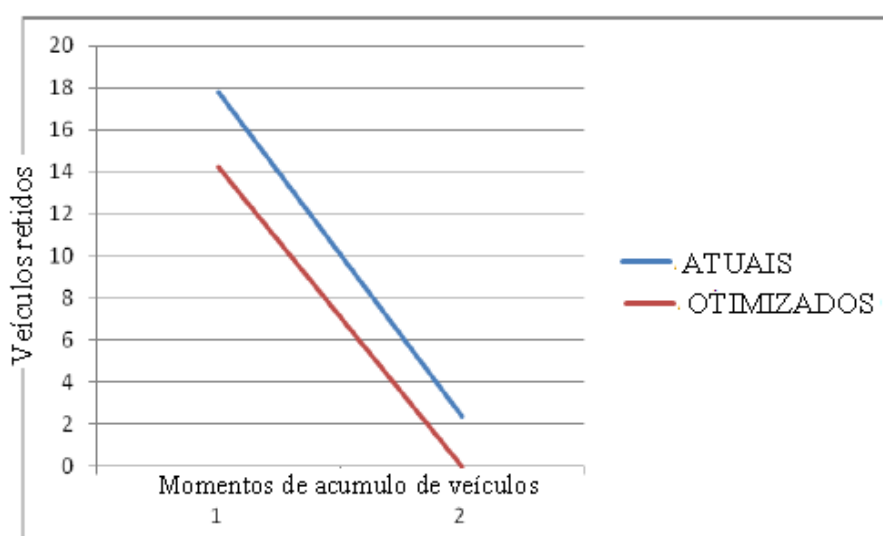


Figura 12: Representação gráfica do número de veículos retidos com tempos semafóricos atuais e otimizados.

4.2.2 Análise das influências no tempo de ciclo para o Estudo Teórico 2

Na busca de verificar as influências que as mudanças dos tempos de ciclo proporcionam nas temporizações semaforicas e nos índices de desempenho atraso uniforme e grau de saturação, a rede do exemplo do Estudo Teórico 2 foi otimizada pelo Modelo 1, com os tempos de ciclo em um intervalo de 84 a 114s, variando de 10 em 10s. Os resultados desta simulação estão descritos na Tabela 26.

Tabela 26: Tempos semaforico, em segundos, graus de saturação por fase (X) e atraso uniforme por cruzamento (AU), em segundos, com diferentes tempos de ciclo

Tempo de ciclo	Cruzamento	Tp	g_{av}	X_{av}	g_{tran}	X_{tran}	AU
84	1	19	44	1,01	21	1,01	51,88
	2	19	37	1,03	28	1,02	52,47
	3	19	46	1,07	19	1,01	53,34
	4	19	45	1,17	20	1,00	56,11
94	1	19	51	0,98	24	0,99	55,81
	2	19	43	1,00	32	1,00	56,43
	3	19	54	1,02	21	1,01	57,27
	4	19	53	1,11	22	1,00	59,97
104	1	19	57	0,97	28	0,94	59,75
	2	19	49	0,97	36	0,99	60,44
	3	19	61	1,00	24	0,99	61,32
	4	19	61	1,07	24	1,00	64,00
114	1	19	64	0,94	31	0,93	63,77
	2	19	54	0,96	41	0,95	64,46
	3	19	68	0,98	27	0,96	65,41
	4	19	68	1,05	27	0,99	68,22

Como pode ser observado na Tabela 26, o aumento do ciclo proporciona uma redução no grau de saturação, indicando, dessa forma, melhoras para este indicativo. Em

contraposição, o aumento do tempo de ciclo acarreta um maior tempo de espera durante o tempo de vermelho, influenciando diretamente no aumento do atraso uniforme.

As Figuras 13 e 14 ilustram as variações nos graus de saturação em função dos tempos de ciclo.

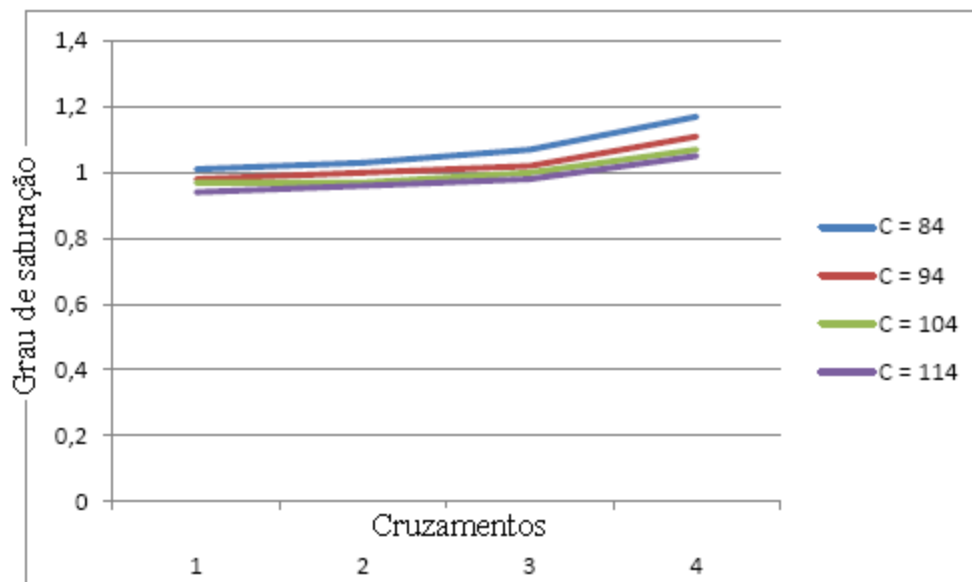


Figura 13: Graus de saturação da avenida Brasil com os diferentes tempos de ciclo

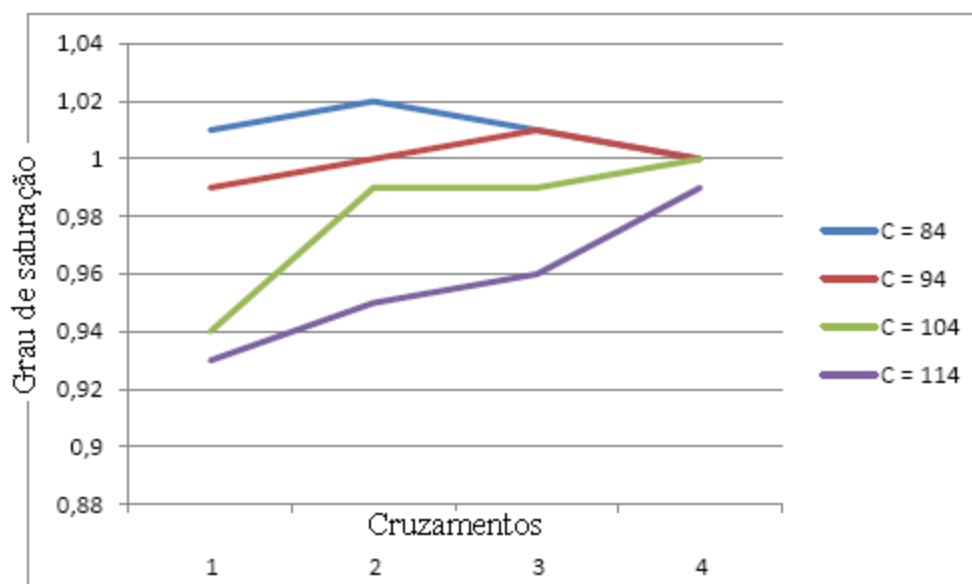


Figura 14: Graus de saturação das vias transversais com os diferentes tempos de ciclos.

Na escolha pelo melhor tempo de ciclo neste caso, teria de ser levado em conta o que proporciona melhor qualidade de trafegabilidade ao usuário da via: o esvaziamento total da via (caixa) ao término do sinal verde (grau de saturação) ou a redução do tempo de espera no sinal vermelho (atraso uniforme).

5 - CONCLUSÃO

Os problemas de trânsito referentes ao alto fluxo veicular fazem parte da vida de grande parcela dos brasileiros, assim como da população mundial, sendo estes mais intensos em cidades de médio e grande porte. Pesquisas e estudos na área do trânsito tendem a sugerir proposta de melhorias para essa situação, por meio de novas técnicas de programação semafóricas.

A otimização, como processo utilizado para determinar a melhor solução dentre um conjunto de soluções aplicadas ao trânsito, mais especificamente à programação semafórica, pode proporcionar melhoras significantes aos índices de desempenhos das vias.

Diante da magnitude que as técnicas de otimização podem proporcionar ao trânsito ao reduzir problemas referentes ao alto fluxo veicular, o presente trabalho teve como principal objetivo contribuir de forma teórica no estudo e sugestão de métodos e modelos matemáticos que, programados, automatizem a obtenção de tempos semafóricos.

Na busca desta contribuição, neste trabalho foi proposto, para a programação semafórica, o uso de dois modelos de otimização de tráfego urbano semafóricos, denominados Modelo 1 e Modelo 2. Os dois modelos foram otimizados pelo meta-heurística *Simulated Annealing* e programados em linguagem Fortran, fornecendo, desta forma, tempos de verde que minimizaram as situações problemas propostas.

O Modelo 1, ao minimizar os índices atraso veicular uniformes e aleatórios, assim como o número de paradas sofridas por um veículo, teve como objetivo minimizar o tempo de percurso veicular em vias semaforizadas. O Modelo 2, assim como o Modelo 1, também teve como função minimizar o tempo total de deslocamento de um veículo, distinguindo-se, porém, deste pela forma de composição da função objetivo.

Com a finalidade de avaliar os modelos, foram feitos estudos em dois exemplos, denominados sucessivamente de Estudo Teórico 1 e Estudo Teórico 2. O Estudo Teórico 1 tratou da aplicação dos modelos em um problema encontrado na literatura, de alocação de tempos semafóricos em três cruzamentos, problema este já resolvido pelo *software* de otimização semafórica Transyt 7F. Quanto ao Estudo Teórico 2, trata-se do emprego de

forma simulada dos modelos em uma rede da região central da cidade de Passo Fundo, constituída por quatro cruzamentos semaforizados.

Para o Estudo Teórico 1, tanto o Modelo 1 como o Modelo 2 forneceram resultados semelhantes aos obtidos pelo Transyt 7F, assim como proporcionaram medidas de desempenhos, atraso uniforme e grau de saturação satisfatórios para as vias. Neste estudo também foi possível perceber, pelos resultados obtidos nas simulações realizadas para o valor de paradas (K) em relação ao Modelo 1, que por possuírem um baixo percentual de variabilidade, que seu valor não influencia significativamente no grau de saturação e no atraso uniforme.

Ainda, para o Modelo 1, em relação à influência nas soluções obtidas, dos parâmetros temperatura inicial (T_0) e do fator de redução da temperatura (α) do método *Simulated Annealing*, avaliando-se quais mudanças ocorreram nas temporizações e no número de iterações, também se observou que não ocorreram alterações nos tempos semaforicos, apesar do número de iterações aumentar significativamente, à medida que o fator de redução aumentava.

Além disso, também foi constatado que possivelmente a solução obtida consiste no ótimo global, uma vez que partindo de soluções iniciais diversas, essa variabilidade de valores não proporcionou nenhuma alteração na temporização semaforica otimizada. Tratando-se da comparação entre os desempenhos dos dois modelos, estes apresentaram resultados iguais quando o fator de penalidade do número de paradas do Modelo 1 foi igual a 10.

Para o Estudo Teórico 2, os tempos otimizados obtidos pelos dois modelos foram os mesmos, sendo que estes, em comparação com os tempos atuais, apresentaram melhoras significativas nos índices de desempenho das vias, reduzindo o número de veículos retidos após o término do tempo verde, o grau de saturação e também o atraso uniforme.

Já se tratando de mudanças nas temporizações do tamanho de ciclo, observam-se melhoras no grau de saturação, a medida que o ciclo é aumentado, mais em contra partida a medida que este aumento ocorre, o atraso uniforme vai aumentando, sugerindo dessa forma obter um tempo de ciclo baseado no que proporciona melhor qualidade de trafegabilidade ao usuário da via: o esvaziamento total da via (caixa) ao término do sinal verde (grau de saturação) ou a redução do tempo de espera no sinal vermelho (atraso uniforme).

Os resultados sugerem que a adoção da metodologia proposta no presente trabalho, no caso específico da região central da cidade de Passo Fundo, pode acarretar em uma melhora significativa nos índices de desempenho das vias estudadas, consistindo unicamente num melhor aproveitamento dos recursos já existentes e implantados.

Cabe enfatizar que o sucesso na aplicação dos modelos está diretamente relacionada à sincronização dos semáforos componentes da rede, a qual, neste estudo, não foi implementada.

Como proposta para a continuidade do presente trabalho, sugere-se, juntamente com os modelos descritos, a implementação de um algoritmo que forneça os tempos de ciclo sincronizados, entre a rede otimizada, assim como um algoritmo que leve em conta o tempo necessário de vermelho total, para que o pedestre possa fazer a travessia da rua com segurança. Também acredita-se que, para comprovar o ganho efetivo obtido, é necessário estender o estudo a uma situação real, aplicando os resultados em uma rede semaforizada, quantificando e comparando os resultados reais com os teóricos obtidos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. M.; MUBIZ, J. A. M.; SOUZA, M. Avaliação do coeficiente de variação como medida de precisão na experimentação com citros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 32, n.12. p.1221-1225, dez. de 1997.
- AMORIM FILHO; O. SERRA, R. V. *Evolução e perspectivas do papel das cidades médias no planejamento urbano e regional*. In: ANDRADE, Thompson Almeida; SERRA Rodrigo Valente. (orgs.). *Cidades Médias Brasileiras*. Rio de Janeiro, 2001.
- ANDRADE, E. L. *Introdução à pesquisa operacional: métodos e técnicas para análise de decisão*. Rio de Janeiro. LTC, 1989.
- ARROYO, J. E. C. *Heurísticas e meta-heurísticas para otimização combinatória multiobjetivo*. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- BASSANEZI, R. C. *Ensino aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia*. São Paulo: Contexto, 2002.
- BASTOS, G. S. *Otimização da operação de centrais hidrelétricas pela distribuição inteligente de carga entre máquinas*. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá: MG, 2004.
- BECK, Roberta Viera. *Metodologia para calibração do modelo de dispersão dos pelotões inserido no software Tansyt*. 1999. Dissertação (Mestrado em Transportes Urbanos) - Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- BIEMBENGUT, M. S.. *Modelagem matemática & implicações no ensino e aprendizagem da matemática*. 2. ed. Blumenau: Furb, 1999.
- BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito. *Manual de semáforos*. 2. ed. Brasília: Denatran, 1984.
- CHILE. *Manual de señalización de tránsito*. Santiago, 2001, Capitulo IV. Disponível em: <<http://www.subtrans.cl/subtrans/documentos/senalizacion.html>>. Acesso em: 1 out. 2010.

GOBBO, A. F. *Proposta de aplicação do sistema de inferência Neuro-Fuzzi pra otimização de tráfego*. 2005. Dissertação (Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - CEFET – PR, Curitiba – 2005.

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P.L. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOOGLE MAPS. *Mapa da cidade de Passo Fundo*. Disponível em: <http://www.google.com.br/#hl=pt-BR&rlz=1R2ADSA_pt-BRBR350&q=mapa+da+cidade+de+passo+fundo&oq> Acesso em: 20 out. 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa IBGE cidades@ – Passo Fundo, 2010*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=431410>> Acesso em: 20 out. 2010.

IPEA. *Rapidez e custo influenciam na escolha do transporte*. Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas – 2011. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=8236>. Acesso em: 6 maio 2011.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

KRIPKA, M. Discrete optimization of trusses by simulated annealing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p. 01, 2004.

LACHTERMACHER, G. *Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel*. Rio de Janeiro. Elsevier, 2007.

LIMA, C. M. V. *Otimização de trânsito – Uma abordagem utilizando algoritmos genéticos*. 2005. Disponível em: <<http://www.cin.ufpe.br/~tg/2005-1/cmvl.doc>>. Acesso em: 20 maio 2009.

LOUREIRO, C. F. G.; GOMES, M. J. T. L.; PIRES, C. H. *Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de interseções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real*: In: CFG Loureiro - 2002. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/scoot.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2009.

McCLAVE, J. T. *Estatística para administração e economia*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MELO, E. F. R. Q.; ROMANINI, A. A gestão da arborização urbana na cidade de Passo Fundo/RS. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v. 2, n. 1, 2007.

MELO, J. P.; LIMA F. G. *Controle de fluxo de potência usando dispositivos facts e metaheurísticas*. Mato Grosso do Sul: UFMS, 2009. Disponível em: <<http://www.propp.ufms.br/gestor/titan.php?target=openFile&fileId=597>>. Acesso em: 20 maio 2010.

METROPOLIS, N. et al. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chem. Phys.*, n. 21, p. 1087-1090, 1953.

NILSSON, Nils J. *Principals of artificial intelligence*. New York: edição de Birkhauser, 1982.

PIAI, J. C.; CERVANTES, S. G. de S. *Um modelo para tráfego urbano e suas otimizações*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, XVIII. 12 a 16 set. 2010, Bonito-MS. *Anais...* Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBA2010/Artigos/66142_1.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2011.

POLTOSI, M.. *Programando soluções para problemas de otimização combinatória*. Universidade do Vale do Rio dos Sinos- 2005. Disponível em: <<http://www.inf.unisinos.br/~barbosa/pipca/consipro1/a13.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2009.

REIS, J. N. W. *Otimização dos fluxos de veículos utilizando o programa TRANSYT 7F*. Universidade Federal de Uberlândia – 2002. Disponível em: <http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/edicao2004/exatas/otimizacao_dos_fluxos.PDF>. Acesso em: 20 ago. 2009.

ROBERTSON, D. I. (1986). Research on TRANSYT and SCOOT Methods of Signal Coordination. (CD ROM) ITE Digital Library: 1997 edition. ITE Journal, p. 36-40, Jan 1986.

SD Consultoria e Engenharia Ltda. *Projeto Final de Engenharia de Estruturação do Anel Viário Central da cidade de Passo Fundo*. 06 volumes. Passo Fundo, RS. 2009.
SILVA, F. A.; SORRATINI, J. A. Avaliação e otimização de interseções semaforizadas. Horizonte Científico, Uberlândia, MG, v. 3, p. 1-23, 2004.

SILVA, P. C. M. *Elementos do sistema de tráfego*. 2001. Disponível em: <<http://www.unb.br/ft/enc/pagdisc/engtraf/apostilas/APOSTILA1.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2009.

SOUZA, M. J. F. *Programação de horários em escolas: uma aproximação por meta-heurísticas*. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - 2000. COPPE. XI, 149 p. Engenharia de Sistemas de Computação

TRL (2011). Software Bureau. Disponível em: < <https://www.trlsoftware.co.uk> >. Acesso em: 13 jul. 2011.

VILANOVA, L. *Programação de um semáforo usando o método do grau de saturação*, 2004. Disponível em: < <http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/saturacao.pdf> >. Acesso em: 20 jun. 2009.

VILANOVA, L. *SIRI - Um novo simulador para redes de semáforos*, 2005. Disponível em: < http://meusite.mackenzie.com.br/professor_cucci/texto29.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2011.

VILCHES, M. A.; CORRÊA, M. L. *Cálculo*. Rio de Janeiro: IME-UERJ, v. 1, 2005.

VILLALOBOS, L. D. C. *Previsão da poluição atmosférica na otimização de semáforos*. In: ENEGEP, 22, 2002, Curitiba. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP_2002_TR100_0051.pdf>. Acesso em: 20 maio 2009.