

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAR O CÁLCULO DE PLANOS PARA
SEMÁFOROS CONSIDERANDO O ATRASO E A POLUIÇÃO
ATMOSFÉRICA**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA**

LUZ DELICIA CASTILLO VILLALOBOS

FLORIANÓPOLIS

SANTA CATARINA- BRASIL

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAR O CÁLCULO DE PLANOS PARA
SEMÁFOROS CONSIDERANDO O ATRASO E A POLUIÇÃO
ATMOSFÉRICA**

LUZ DELICIA CASTILLO VILLALOBOS

**ESTA TESE FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA
E APROVADA EM SUA FORMA ORIGINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

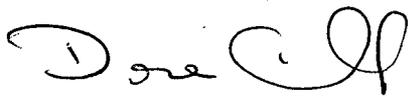
Prof. EUNICE PASSÁGLIA, Dr.- Orientadora


Prof. RICARDO MIRANDA BÁRCIA, PhD - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA


Prof. EUNICE PASSÁGLIA, Dr. - Orientadora


Prof. ROBERT WAYNE SAMOHYL, PhD.


Prof. DORA ORTH, Dr.


Prof. LENISE GRANDO GOLDNER, Dr.


Prof. CHRISTIAN JOSÉ QUINTANA PINEDO, Dr.

Dedico esta tese á
Nosso Senhor **JESÚS CRISTO**

A meus filhos:

Milagros Q. Castillo

Jesús André Q. Castillo

A minha mãe:

Magdalena Villalobos Montenegro

AGRADECIMENTOS

A Professora Eunice Passágua pela constante orientação e sugestões.

Aos membros da banca examinadora, pela participação e sugestões encaminhadas.

A meus filhos Milagros e André por seu constante apoio e motivação.

A Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP.

Aos Professores demais funcionários e companheiros do PPGEP.

RESUMO

Este trabalho descreve uma metodologia que permite elaborar planos para semáforos operando a tempo fixo modo isolado. Visa-se a uma programação ótima, tendo como critério de otimização o atraso sofrido pelos veículos e a poluição que estes produzem ao passar pela interseção sinalizada. Tal metodologia utiliza uma integração de métodos da área de Engenharia de Tráfego, como o dimensionamento de semáforos, com os conceitos de poluição atmosférica. Esta integração é obtida através de uma relação entre o atraso veicular medido em segundos e o grau de poluição medido em concentração de CO, utilizando-se, para tanto, como ferramentas, conceitos de Otimização e Análise de Regressão. Os resultados obtidos a partir da metodologia proposta aqui permitem programar semáforos, de modo que a poluição produzida pelos veículos seja mínima em um determinado ponto de observação da interseção selecionada, possibilitando tomar decisões sobre seu funcionamento.

ABSTRACT

This work describes a methodology that makes possible to elaborate plans for traffic lights operating with fixed time and in isolated mode, whose programming must be optimized. As optimization criterion we will take into account the delay experienced by vehicles and pollution they cause when they cross the signaled intersection. In its resolution, developed methodology use an integration of methods from traffic area, as traffic lights programming, with atmospheric pollution concepts. This integration happens through a relation between vehicle delay, measured in seconds, and pollution degree, measured in CO concentration. For this, we use Optimization and Regression Analysis. The results obtained by developed methodology are positive, because it makes possible to program traffic lights, whose caused pollution is minimized at a given point of observation in selected intersection. This makes possible to make decisions about its functioning.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE QUADROS	VII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 - APRESENTAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA.....	3
1.3 - CONTRIBUIÇÃO PARA A CIÊNCIA	5
1.4 - OBJETIVOS.....	6
1.5 – JUSTIFICATIVA	7
1.6 - PROCEDIMENTOS MEDODOLÓGICOS DO ESTUDO.....	9
1.7 - LIMITAÇÕES DO ESTUDO	11
1.8 - ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DA TESE.....	12
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 - POLUIÇÃO DO AR	14
2.1.1 – Parâmetros de Qualidade do Ar	15
2.1.2 – Padrões de Qualidade do Ar	19
2.1.3 – Processo de Concentração de Poluentes	21
2.1.4 – Tráfego de Veículos Motorizados como Fontes de Emissão de Poluentes	22
2.1.5 – Capacidade Ambiental	24
2.1.6 – Variáveis de Emissão de Poluentes Urbanos	26
2.1.7 – Fatores de Dispersão de Poluentes	28
2.1.8 – Modelos de Dispersão Atmosférica	29
2.2 – CONTROLE DE TRÁFEGO EM CRUZAMENTOS SEMAFORIZADOS	33
2.2.1 – Objetivo Geral do Controle de Tráfego nos Cruzamentos SemafORIZADOS	34
2.2.2 – Planos de Sinalização Semafórica	34
2.2.3 – Aspectos Operacionais	35
2.2.3.1 – Controle a Tempo Fixo	35
2.2.3.2 – Controle Atuado pelo Tráfego	36
2.2.4 – Modo de Operação Isolada	37

2.2.5 – Regulagem de Semáforos em Cruzamentos Isolados	37
2.2.5.1 – Tempo de Ciclo Ótimo	37
2.2.5.2 – Porção de Verde	38
2.2.6 – Planos Semafóricos para Semáforos Operando a Tempo Fixo e Modo Isolado	39
2.3 – ANTECEDENTES DO PROBLEMA	39
2.3.1 – Método de Matzoros	39
2.3.2 – Método de Dennis e Nigel	46
2.3.3 – Método de Mazen e Hassounah	51
2.3.4 – Pesquisa Realizada por Michael, Bull e Zimmann	52
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA PROPOSTA	57
3.1 – SELEÇÃO DA INTERSEÇÃO A SER ANALIZADA	58
3.1.1 – Critérios Considerados para a Escolha da Interseção	58
3.1.2 – Parâmetros Adotados	59
3.1.2.1 – Parâmetros de Tráfego	59
3.1.2.2 – Parâmetros de Poluição atmosférica	59
3.1.2.3 – Parâmetros de Sinalização	60
3.1.2.4 – Parâmetros de Atrasos Veiculares	61
3.1.2.5 – Parâmetros Geométricos da Via	61
3.2 – LEVANTAMENTO DE CAMPO	61
3.2.1 – Determinar as Características da Interseção onde Serão Coletados os Dados	61
3.2.2 – Determinar as Características do Semáforo em Operação	62
3.2.3 – Levantamento dos Dados	62
3.2.3.1 – Dados Colhidos Durante a Pesquisa	62
3.2.3.2 – Dados Pertencente a Outras Fontes ou Épocas Anteriores	63
3.3 – ANÁLISE DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA	64
3.3.1 – Teste de Aderência	65
3.3.2 – Teste de Diferença de Médias	65
3.3.2.1 – Teste Para Amostras Independentes	65
3.3.2.2 – Teste de Diferença de Médias com Dados Pareados	65

3.3.3 – Análise de Variância (ANOVA)	66
3.4 – CÁLCULO DOS ATRASOS VEICULARES	67
3.4.1 – Método de Webster	67
3.4.2 – Método Allsop	68
3.5 – REALAÇÃO ENTRE ATRASO E POLUIÇÃO	70
3.5.1 – Relacionamento Linear entre as Variáveis	70
3.5.2 – Estudo da Adequação do Modelo de Regressão Linear	72
3.5.2.1 – Análise de Resíduos	72
3.5.2.2 – Teste de Durbin-Watson (Dw)	73
3.5.2.3 – Teste de Normalidade, Usando o Coeficiente de Correlação dos Resíduos (r)	73
3.5.3 – Relação não Linear entre as Variáveis	74
3.6 – OTIMIZAÇÃO DO SEMÁFORO DA INTERSEÇÃO SELECIONADA	76
3.6.1 – Condições Necessárias para Otimizar o Semáforo	76
3.6.2 – Dimensionamento do Semáforo da Interseção Seleccionada	79
3.6.3 – Cálculo do Atraso Produzido pelo Plano Ótimo Calculado	85
3.6.4 – Previsão da poluição	85
CAPÍTULO 4 – APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	87
4.1 – ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DA INTERSEÇÃO	87
4.2 – LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	91
4.2.1 – Dados Colhidos de Outra Fonte	91
4.2.2 – Dados Colhidos Durante a Pesquisa	93
4.2.3 – Comparação e Avaliação dos Dados por Análise Estatística	94
4.2.3.1 – Teste de Aderência (K-S)	95
4.2.3.2 – Teste de Diferença de Médias com Dados Pareados	95
4.3 – CÁLCULO DOS ATRASOS VEICULARES E SUAS RELAÇÕES COM A POLUIÇÃO NA INTERSEÇÃO EM ESTUDO	97
4.3.1 – Cálculo dos Atrasos Veiculares na Interseção em Estudo	97
4.3.1.1 – Atrasos Calculados pelo Método de Webster (1958)	98
4.3.1.2 – Atrasos Calculados pelo Método de Allsop (1981)	100

4.3.2 – Cálculo da Relação entre Atraso e Poluição	101
4.3.2.1 – Relação Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	102
4.3.2.1.1 – Ajuste do Modelo de Regressão, entre Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	104
4.3.2.1.2 – Estudo da Adequação do Modelo de Regressão entre Atraso (Calculado Segundo Webster, 1958) e Poluição	106
4.3.2.2 – Relação Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição	111
4.3.2.2.1 – Ajuste do Modelo de Regressão, entre Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição	111
4.3.2.2.2 - Estudo da Adequação do Modelo de regressão entre Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição	115
4.3.2.3 – Relação Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição, Corrigida	119
4.3.2.3.1 – Ajuste do Modelo de Regressão Transformado	120
4.3.2.3.2 – Adequação do Modelo de Regressão Transformado	124
4.3.3 – Resumo dos Resultados do Ajuste e da Adequação dos Modelos de Regressão	128
4.4 – CÁLCULO DA PROGRAMÇÃO ÓTIMA DO SEMÁFORO DA INTERSEÇÃO SELECIONADA	131
4.4.1 – Dimensionamento do Semáforo da Interseção Seleccionada	131
4.4.2 – Cálculo do Atraso produzido pelos Planos Ótimos	137
4.4.3 – Previsão da Poluição Mínima para Ambos os Planos	137
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	142
5.1 – CONCLUSÕES	142
5.2 – RECOMENDAÇÕES	144
ANEXO	146
BIBLIOGRAFIA	154

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Processo De Lançamento Dos Poluentes Na Atmosfera	18
FIGURAS 2.2 – Sistema De Coordenadas Mostrando AS Distribuições Gaussiana nas Direções Horizontal e Vertical. Extraído de Cohn e Mevoy (1982)	32
FIGURA 2.3 – Mostra a Relação entre a concentração de CO dos Cinco Receptores Apresentados na Figura 2.5 e os Fluxos Veiculares, em um Intervalo de 500 a 1300 v/h. Em um Cruzamento com Semáforo	41
FIGURA 2.4 - Mostra a Relação entre a concentração de CO dos Cinco Receptores Apresentados na Figura 2.5 e os Fluxos Veiculares, em um Intervalo de 500 a 1300 v/h. Em um Cruzamento com Placa	42
FIGURA 2.5 – Posição dos Cinco Receptores	43
FIGURA 2.6 – Relação entre a Concentração de CO e os Modos de Operação, para Fluxos Variados. Cruzamento com Semáforo	44
FIGURA 2.7 - Relação entre a Concentração de CO e os Modos de Operação, para Fluxos Variados. Cruzamento com Placa	44
FIGURA 2.8 – Av. Oriental, em Londres, com Seis Sinais	47
FIGURA 2.9 – Relação do Tempo Gasto e Fluxo Veicular que Passa pela Interseção 8, no Período AM	47
FIGURA 2.10 – Relação entre Taxa de Emissão e Velocidade para Veículos a Gasolina	55
FIGURA 2.11 - Relação entre Taxa de Emissão e Velocidade para Veículos Pesados	56
FIGURA 3.1 – Ciclo Ótimo para Atraso Mínimo	77
FIGURA 3.2 – Ciclo Ótimo para Poluição Mínima	78
FIGURA 4.1 – Representação Esquemática da Interseção Seleccionada	89
FIGURA 4.2 – Representação Esquemática dos Estágios do Semáforo em Operação	90
FIGURA 4.3 – Número de Movimentos por Estágio e Grupo Focal	90
FIGURA 4.4 – Diagrama de Tempos	91
FIGURA 4.5 – Posicionamento dos Pesquisadores que Fazem a Contagem	94

FIGURA 4.6 – Diagrama de Dispersão da Relação Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	102
FIGURA 4.7 – Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados do Modelo Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	108
FIGURA 4.8 – Gráfico de Resíduos Contra o Tempo do Modelo Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	109
FIGURA 4.9 – Gráfico de Normalidade dos Resíduos do Modelo Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	110
FIGURA 4.10 – Diagrama de Dispersão da Relação Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição	112
FIGURA 4.11 - Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados do Modelo Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição	116
FIGURA 4.12 - Gráfico de Normalidade dos Resíduos do Modelo Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição	119
FIGURA 4.13: Diagrama de Dispersão (Atraso vs ln. Poluição)	122
FIGURA 4.14: Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados do Modelo Transformado.....	124
FIGURA 4.15: Gráfico de Normalidade dos Resíduos do Modelo Transformado	127
FIGURA 4.16 – Representação Gráfica do Tempo de Ciclo Ótimo e seu Respectivo Atraso Mínimo e Poluição Mínima	140

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Principais Fontes de Poluição do Ar e Principais Poluentes.....	17
QUADRO 2.2 - Padrões de Qualidade do Ar	21
QUADRO 2.3 – Taxa de Emissão de 27 Veículos Americanos, Ano, Modelo e Modo de Operação.....	27
QUADRO 2.4 - Modelos de Dispersão- características e campos de aplicação	30
QUADRO 2.5 – Dados Do Modelo De Emissão	40
QUADRO 2.6 – Resumo dos Resultados da Av. 12 – Mudanças na Fila Média (MOVA-CLF)	48
QUADRO 2.7 – Previsões das Taxas de Emissão (em kg/h)	49
QUADRO 4.1 - Fluxos Veiculares Observados na Rua Heitor Luz, nos anos de 1998 e 1999.....	96
QUADRO 4.2 - Grau de Saturação	98
QUADRO 4.3 – Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Webster, 1958).....	99
QUADRO 4.4 - Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Allsop, 1981)	101
QUADRO 4.5.– Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	103
QUADRO 4.6 - Análise de Variância do Modelo Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e poluição	105
QUADRO 4.7 - Valores Ajustado da Poluição e Resíduos do Modelo Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição	107
QUADRO 4.8 – Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição	113
QUADRO 4.9 - Análise de Variância do Modelo, Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição	114
QUADRO 4.10 - Valores ajustado da Poluição e Resíduos do Modelo Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição	117

QUADRO 4.11 – Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Logaritmo Neperiano da Poluição para o Modelo Transformado	121
QUADRO 4.12 - Análise de Variância do Modelo Transformado	123
QUADRO 4.13 - Valores Ajustados (Ln. Poluição) e Resíduos do Modelo Transformado	125
QUADRO 4.14 - Resultados Obtidos no Ajuste dos Modelos de Regressão	129
QUADRO 4.15 - Resumo dos Resultados Obtidos da Adequação dos Modelos de Regressão	130
QUADRO 4.16 – Resultados do Dimensionamento dos Planos Semafóricos da Interseção Seleccionada	136
QUADRO 4.17 – Comparação das Programações Ótimas do Semáforo da Interseção Analisada com o Semáforo em Operação	138
QUADRO 4.18 – Planos Semafóricos Calculados para Tempos de Ciclo Especificados	140
QUADRO A-1 - Dados Observados na Rua Heitor Luz	146
QUADRO A-2 – Fluxos Veiculares Observados no Cruzamento Heitor Luz e Mauro Ramos, 1999.....	149

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As questões ligadas ao Meio Ambiente constituem um dos temas que mais preocupam neste final de século. A necessidade de redução dos poluentes do ar tornou-se um problema mundial. Seu estudo é cada vez mais complexo, pois muitos fatores ingovernáveis intervêm na formação de poluentes.

O processo de poluição da atmosfera se inicia com a emissão dos poluentes por fontes, que tanto podem ser naturais- como os vulcões- quanto produzidas pelo homem, como as atividades industriais, o trânsito, os meios de transporte movidos a combustíveis, etc.

As primeiras fontes de poluição do ar nas regiões urbanas, ou seja, aquelas que de fato apresentam um impacto global sobre a qualidade do ar, são os veículos automotores e outras fontes móveis, como: aeronaves, locomotivas, embarcações, etc.; os processos industriais de extração e transformação; os processos de geração de calor industrial; a queima de resíduos; e as operações de transporte, estocagem e transferências de combustíveis, e outros produtos

voláteis. Numa escala mais localizada, temos as fontes que representam um incômodo para a vizinhança tais como pequenas caldeiras, restaurantes, padarias, construção civil, estradas não pavimentadas, entre outras.

Atualmente, devido aos programas de controle de poluição industrial que vêm sendo desenvolvidos em diversos países, estudos mostram que os veículos automotores se tornaram uma das principais fontes de poluição do ar, em áreas urbanas (Matzoros, 1992). Em 1987, nos Estados Unidos o tráfego automotor foi responsável por 66% das emissões totais de CO, 48% de HC, 43% de Nox e 37% de emissões de chumbo (EPA e OTA, 1989 e Matzoros, 1992). Na maior área da cidade de Atenas, esse tipo de tráfego é responsável por 100% de emissões de CO por ano, 79% de HC, 77% de Nox e 64% de fumaça (Patas e Samaras, 1990 e Matzoros, 1992).

Para controlar esta poluição, foram impostos padrões de emissão para carros novos em muitos países europeus, Estados Unidos, Japão, etc. (Tratado amplamente por Cortese, 1990; Nishioka, 1989; Patas e Samaras, 1990; Matzoros, 1992). Isto não é suficiente, já que o aumento de veículos motorizados para o futuro contrabalançará os efeitos das tecnologias presentes. Um exemplo deste crescimento era que em 1950, quando a terra era povoada por 2,6 bilhões de pessoas, existiam 50 milhões de carros; em 1996 éramos 5,5 bilhões a bordo de 500 milhões de automóveis. A população dobrou e o número de carros ficou dez vezes maior. Somente no ano 1996, 50 milhões de novos carros começaram a rodar no mundo inteiro. Quase 2 milhões deles no Brasil, 1000 a cada dia apenas na cidade de São Paulo. No ano 2000, a frota brasileira tinha 50% mais carros do que os 18 milhões do ano 1996. Em 2003, esta será o dobro. Portanto, é preciso o uso de regulamentos e incentivos para reduzir o uso de carros (Varella, 1996 e Carneiro, 1998).

Também se faz necessário a aplicação de medidas de administração de tráfego para suavizar o fluxo veicular e reduzir atrasos, início de paradas, acelerações, etc., em ambientes urbanos.

Muitos cientistas se preocuparam em reduzir os efeitos da poluição do ar provocado pelos veículos motorizados, como por exemplo Potter e Savage (1982) e (1983); Clagget, Schrock e Noll (1981); Horowitz (1982); Patterson e Meyer (1975); Matzoros (1992). Portanto, estes estudos motivaram para a realização do presente trabalho, que se apresenta como um aporte para o melhoramento das programações dos semáforos.

1.2- APRESENTAÇÃO DO TEMA DE PESQUISA

Este trabalho aparece como uma contribuição para orientar as políticas e planos de tráfego na melhoria da qualidade do ar, através da redução dos poluentes produzidos pelos veículos motorizados, que passam por uma interseção sinalizada. Buscando com este objetivo, melhorar a qualidade de vida das pessoas.

Assim, a presente pesquisa está subordinada às seguintes áreas do conhecimento científico: Engenharia de Tráfego e poluição atmosférica.

Esta pesquisa é desenvolvida em uma interseção controlada por semáforo, já que considera-se que a maior poluição emitida pelo trânsito, acontece nos cruzamentos (Matzoros, 1992).

Portanto, o trabalho está voltado para o cálculo de planos semaforicos, cuja programação seja ótima. Tendo como critério de otimização o atraso e o grau de poluição, isto é, o plano semaforico será ótimo, quando o atraso e a poluição sejam o mínimo possível.

O problema do estabelecimento de um plano semaforico é, em sua forma geral, o de encontrar os valores do ciclo e das repartições verde e vermelho de cada fase, de forma a melhor atender os critérios pré-estabelecidos.

Sabe-se que o valor do ciclo guarda relação com o atraso dos veículos e com a capacidade da interseção, pois a medida que diminui o tempo de ciclo, o atraso tende a diminuir até um valor ótimo (ou mínimo), a partir do qual o atraso volta a crescer. No entanto, a capacidade da interseção também decresce, com a diminuição do tempo de ciclo. Portanto, a preocupação neste trabalho é determinar o que acontece com a poluição, em relação ao atraso para um valor determinado de tempo de ciclo? Um maior atraso provoca uma maior poluição? Estas perguntas serão respondidas neste trabalho.

Na programação de um semáforo, diminui-se o tempo de vermelho através da redução do ciclo, o tempo de espera torna-se proporcional, tendência esta que permanece até um certo valor do ciclo. Para ciclos inferiores a este valor, o tempo necessário para o veículo se deslocar passa a ser significativo diante do tempo de verde, o que implica em um aumento do tempo de espera. Como consequência deste problema, o que acontece com a poluição neste momento? Deduz-se, então, a existência de uma relação entre tempo de espera e a quantidade de poluentes emitidos, para um determinado tempo de ciclo e para uma dada situação.

Também, a mudança dos modos de operação (aceleração, desaceleração e fila), função das características do sistema de tráfego, alteram os fatores de emissão, estas mudanças são mais acentuadas nas interseções, mais ainda com a presença de um semáforo. Portanto, no presente trabalho busca-se minimizar estas mudanças, tendo como conseqüência a minimização de seus impactos (emissão de poluentes). Em outras palavras, a preocupação é, calcular um tempo de ciclo que melhor atenda a interseção em termos de segurança e qualidade de ar.

1.3 - CONTRIBUIÇÃO PARA A CIÊNCIA

Este trabalho poderá servir como uma contribuição muito importante à ciência, tanto no que diz respeito à Engenharia de tráfego, quanto à poluição atmosférica.

Em relação à Engenharia de Tráfego, esta contribuição é apresentada em forma de ferramentas que podem ajudar os técnicos da área a elaborar planos semaforicos, cujas programações sejam ótimas, considerando, além do atraso mínimo, o fator poluição.

Quanto à poluição atmosférica, a referida contribuição está ligada à forma como a metodologia proposta permite elaborar planos semaforicos que a considerem, levando, com isto, ao melhoramento da qualidade do ar nas interseções sinalizadas, já que é onde se registram os mais altos níveis de poluição.

A metodologia empregada em sua resolução utiliza uma integração de métodos da área de tráfego como o dimensionamento de

planos semafóricos, cujo ciclo seja ótimo com conceitos de poluição atmosférica. Esta integração ocorre através de uma relação entre o atraso veicular e o grau de concentração de CO, utilizando-se, para tanto, como ferramentas, conceitos de Cálculo Diferencial e Integral, Otimização e Análise de Regressão.

Como conclusão, a contribuição mais importante do presente trabalho é construir planos para semáforos, cuja programação considera o grau de poluição, isto é, o plano será considerado ótimo quando a poluição produzida por este for mínima, e esta poluição esteja dentro dos limites permitidos.

I.4 - OBJETIVOS

1.4.1 - Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia que calcule planos para semáforos isolados, operando a tempo fixo, cuja programação seja ótima, tendo como critérios de otimização a poluição atmosférica e o atraso, produzidos pelos veículos que passam pelo cruzamento. Assim, além de organizar o escoamento de veículos e pedestres busca-se melhorar a qualidade de vida na região atingida.

1.4.2 – Objetivos Específicos

Esta metodologia leva em consideração os seguintes aspectos:

- estabelecer uma relação de melhor ajuste entre atraso e poluição atmosférica para cada ponto de observação;
- as observações devem ser feitas nos horários de pico, durante um período determinado (uma hora, um dia, uma semana. etc.), utilizando como medida de poluição o grau de concentração de CO;
- otimizar o tempo de ciclo e os períodos de verde de cada fase, de forma a minimizar o atraso e a poluição atmosférica, respondendo a seguinte pergunta: como consequência de uma inadequada programação, um maior atraso provoca uma maior poluição?

1.5 – JUSTIFICATIVAS

O crescimento da frota automobilística, em nossas cidades, trazem consigo os problemas de poluição ambiental. O que mais preocupa nesta problemática são os efeitos maléficos que estes poluentes causam, sobre a saúde e a vida dos seres vivos.

Estudos epidemiológicos e toxicológicos conduzidos por entidades de reconhecida reputação internacional, por exemplo, a Organização Mundial da Saúde, demonstram haver uma forte relação entre a ocorrência da poluição atmosférica e o aumento de casos de doenças respiratórias, podendo-se citar: asma, bronquite, infecção pulmonar. Da mesma forma, existe a relação de casos envolvendo situações de desconforto físico: irritação dos olhos, nariz e garganta, dor de cabeça, acessos de tosse e sensação de cansaço. Esses problemas têm alto custo social, sendo caracterizados por gastos com

tratamentos médicos, perda de horas de trabalho, e redução da produtividade. Boa parte desses custos é transferida ao estado através dos serviços de saúde e previdência social públicos.

É importante destacar que a poluição atmosférica tem sido causa de mortes, seja na forma de precursora de doenças, dentre elas o câncer pulmonar, seja como responsável pelo agravamento de doenças cardiorespiratórias. A literatura especializada registra diversos episódios agudos de poluição do ar envolvendo casos fatais. O mais famoso deles ocorreu em 1952, em Londres, quando um grande aumento das concentrações de óxido de enxofre e partículas, mantiveram-se por quatro dias, em decorrência de condições climáticas desfavoráveis à dispersão dos poluentes - falta de vento, resultando na morte de aproximadamente 4700 pessoas (Murgel, 1990).

A poluição do ar também provoca a deterioração de diversos materiais: couro, borracha, materiais sintéticos, tecidos, pigmentos, papel, metais e outros, ocasionando prejuízos econômicos à sociedade, devido à necessidade de sua substituição e/ou de sua manutenção freqüente. Como exemplo internacionalmente conhecido, temos os monumentos históricos que se encontram em zonas poluídas, como o Coliseu em Roma, ou a Acrópole em Atenas. Esses monumentos suportaram, durante séculos, sem maiores danos, os efeitos ambientais. Entretanto, nas últimas décadas, têm sofrido grave deterioração como conseqüência de perda de material superficial causado, principalmente, pela ação do óxido de enxofre.

A poluição do ar afeta ainda o desenvolvimento de culturas agrícolas, florestas, matas nativas e plantas ornamentais; através da diminuição da resistência das plantas a doenças e pragas, queda na produtividade e comprometimento do aspecto e qualidade da cultura

(fatos que afetam seu valor de venda).O prejuízo das perdas comerciais diretas, devido à ação dos oxidantes fotoquímicos na agricultura da Califórnia, chega a um bilhão de dólares por ano (Murgel, 1990).

Também os efeitos sobre os animais são significativos; vão desde os males à saúde até o acúmulo de poluentes tóxicos, e sua transferência a outros seres através da cadeia alimentar.

Como podemos observar, é evidente que a prevenção da poluição deve ser vista e entendida como uma das prioridades sociais. Qualquer processo de redução de poluentes no meio ambiente deve ser considerado importante, já que contribui para a melhoria da qualidade de vida nas regiões atingidas.

A programação de um semáforo que levar em conta o grau de poluição deve buscar o plano, cuja programação produz a menor poluição, no ponto de observação da interseção analisada.

Nos países industrializados, e em desenvolvimento, a poluição do ar ocorrida nas interseções tornou-se um problema complexo, devido ao crescimento descontrolado do tráfego veicular. No caso do Brasil, os processos de programação das interseções ainda não consideram esta variável de emissão de poluentes, mas as técnicas de controle de tráfego estão avançando positivamente.

1.6 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DO ESTUDO

O estudo em questão foi desenvolvido em diversas etapas, que juntas integram o trabalho desenvolvido. Assim, o estudo teve início

definindo os objetivos já apresentados na seção (1.4). O primeiro passo foi realizar um levantamento bibliográfico acerca dos conceitos relacionados com: poluição atmosférica; controle do tráfego nas interseções sinalizadas por semáforo; pesquisas do tema em questão buscando conhecer as técnicas, métodos empregados e resultados já obtidos.

Tendo conhecimento dos conceitos, técnicas e métodos, partiu-se para o desenvolvimento de um novo método que ajude na solução das questões formuladas neste trabalho. O método proposto apresenta várias etapas como: seleção da interseção sinalizada, trabalho de campo, cálculo dos atrasos veiculares, estabelecimento de uma relação entre atraso e poluição utilizando análise de regressão e, finalmente, o dimensionamento do plano, cuja programação seja ótima para o semáforo da interseção selecionada.

Após o desenvolvimento do método, o próximo passo foi sua validação. Para tanto, o método proposto foi aplicado em uma interseção localizada no centro da cidade de Florianópolis entre as ruas Heitor Luz e Mauro Ramos. No cálculo dos atrasos veiculares e no dimensionamento dos semáforos foram utilizados dois métodos: o método de Webster e Cobbe (1966) e o método de Allsop (1981). Estes métodos fazem parte das ferramentas da metodologia proposta.

O trabalho é encerrado apresentando as conclusões obtidas pela aplicação do método.

1.7 – LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este estudo pela sua natureza, só pode ser aplicado em interseções com semáforo.

A estratégia de controle dos semáforos, utilizados para este estudo, é o “controle a tempo fixo”. Os planos a tempo fixo são aqueles que são acionados segundo uma tabela de horários que não é modificada pelos padrões de tráfego. Nestes planos o tempo de ciclo é constante e a duração e os instantes de mudança dos estágios são fixos em relação ao ciclo para o período considerado. Podem facilitar a coordenação de semáforos adjacentes com maior facilidade do que os controlados pelo tráfego, devido à constância do tempo de ciclo e de sua partição de verdes. Não dependem dos detectores veiculares e, portanto, não são afetados por anomalias no detector como, por exemplo, no caso de obras na via ou de veículos estacionados sobre as mesmas. Apresentam resultados satisfatórios em cruzamentos, onde os padrões são relativamente estáveis e têm um comportamento cíclico e previsível.

O modo de operação utilizada é “isolada”. Neste caso, o controle dos movimentos de tráfego baseia-se nas condições existentes no próprio cruzamento, não sendo consideradas eventuais interferências exercidas pela operação dos semáforos adjacentes. Os planos semaforicos isolados são recomendáveis para fazer previsão de emissões de poluentes nas interseções, já que estes planos reduzem a emissão de CO aproximadamente em 16% em relação aos planos sincronizados nos períodos de pico. Esta diferença de desempenho dos modos de operação se deve ao fato de que os planos isolados reduzem mais o tamanho da fila média em comparação com os planos sincronizados nos períodos de pico (Dennis e Nigel, 1996). Menor o

tamanho da fila, menor o número de veículos desacelerando, acelerando e parando com motor ligado, portanto, menor poluição.

As observações tanto dos fluxos veiculares como das concentrações de CO, devem ser feitas nos horários de pico, já que nestes horários as interseções ficam mais carregadas em termos de tráfego.

Outra limitação importante é a medida da poluição atmosférica, para tanto é utilizado o grau de concentração de CO. A escolha da concentração de monóxido de carbono para representar a poluição atmosférica, deve-se a importância que este tipo de poluente tem para a qualidade do ar urbano, já que o CO é o poluente mais importante emitido pelo trânsito (Matzoros, 1992).

1.8 – ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DA TESE

O primeiro capítulo desta tese discorre sobre as questões introdutórias, através das quais pode-se conhecer o tema a ser tratado, como: o tema de pesquisa, contribuição, objetivos e a justificativa do trabalho. Este capítulo cobre, também, considerações a respeito das limitações do trabalho.

No segundo capítulo, são apresentados conceitos importantes utilizados na elaboração do presente trabalho como: poluição do ar, controle de tráfego em cruzamentos semaforizados e também, são apresentadas pesquisas já realizadas sobre o tema em estudo.

No terceiro capítulo é descrito em detalhes a metodologia proposta para a execução desta tese, sendo esta a principal contribuição científica da tese aqui apresentada.

No quarto capítulo é apresentado a aplicação da metodologia, em trabalho de campo realizado no centro urbano de Florianópolis, Estado de Santa Catarina, no sul do Brasil.

No quinto capítulo são apresentados as informações conclusivas deste trabalho, colocadas em relação aos objetivos e às contribuições científicas desta pesquisa. Apresenta-se ainda recomendações para trabalhos futuros.

No final da tese, são listadas as referências bibliográficas e anexados documentos com informações adicionais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Neste item, serão apresentados temas importantes utilizados na elaboração da presente tese. Em princípio serão apresentados os conceitos relacionados com a poluição do ar, assim como, os conceitos relacionados com o controle de tráfego em cruzamentos semaforizados e, finalmente, serão apresentadas algumas pesquisas sobre o tema em discussão.

2.1-POLUIÇÃO DO AR

A atmosfera pode ser considerada como um local onde, permanentemente, ocorrem reações químicas, pois, absorve uma grande variedade de sólidos, gases e líquidos provenientes de fontes, tanto naturais como industriais, que podem dispersar, reagir entre si ou com outras substâncias já presentes na mesma. Estas substâncias ou o produto de suas reações finalmente encontram seu destino num sorvedouro, como o oceano, ou alcançam um receptor, como o

homem. É difícil definir o termo poluente, mas de modo geral, qualquer substância que eventualmente venha causar incômodo ou desconforto ou perigo ao homem pode ser incluída nessa categoria. Isso significa, sem dúvida, que se deve definir as concentrações nas quais cada um dos materiais se torna poluente e avaliar as concentrações críticas dos possíveis precursores. Obviamente, então a quantidade total de um poluente específico tem apenas importância secundária em relação ao efeito que causa no meio ambiente (Benn e McAuliffe, 1981).

A concentração real dos poluentes do ar dependem dos mecanismos de emissão e dispersão. Normalmente, a própria atmosfera dispersa o poluente, misturando-o eficientemente com um grande volume de ar, o que contribui para que a poluição fique em níveis aceitáveis. As velocidades de dispersão variam muito com a topografia e as condições meteorológicas.

2.1.1- Parâmetros de Qualidade do Ar

O nível de poluição do ar é medido pela quantificação das substâncias poluentes. Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público.

A variedade de substâncias que podem estar presentes na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação.

Entretanto, pode-se iniciar este processo dividindo os poluentes em duas categorias:

- Poluentes primários: aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão;
- Poluentes secundários: aqueles formados na atmosfera através da reação química entre poluentes e constituintes naturais da atmosfera (CETESB, 1996).

As substâncias usualmente consideradas poluentes do ar podem ser classificadas da seguinte forma:

- compostos de enxofre (SO_2 , SO_3 , H_2S , sulfatos);
- compostos de nitrogênio (NO , NO_2 , NH_3 , HNO_3 , nitratos);
- compostos orgânicos de carbono (hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos);
- monóxido de carbono e dióxido de carbono;
- compostos halogenados (HCl , HF , cloretos e fluoretos);
- material particulado (mistura de compostos no estado sólido ou líquido).

Observa-se, primeiramente, que esta classificação é feita na base química física, pois o grupo "material particulado" se refere ao estado físico, enquanto os outros a uma classificação química. O grupo "material particulado" pode também ser formado por compostos de enxofre, carbono, nitrogênio etc. (CETESB, 1996).

O quadro 2.1 mostra de forma simplificada os principais poluentes atmosféricos produzidos pelos diferentes tipos de fontes de emissão.

Quadro 2.1 – Principais Fontes de Poluição do Ar e Principais Poluentes.

FONTE		POLUENTES
Fontes Estacionárias	Combustão	Material particulado Dióxido de enxofre e trióxido de enxofre monóxido de carbono, hidrocarboneto e óxido de nitrogênio
	Processo industrial	Material particulado (fumos, poeiras, névoas) Gases. SO ₂ , SO ₃ , Hcl, Hidrocarbonetos, mercaptanas. HF, H ₂ S, Nox
	Queima de resíduo sólido	Material particulado Gases, SO ₂ , SO ₃ , HCL, NOX
	Outros	Hidrocarboneto, material particulado
Fontes móveis	Veículos gasolina/diesel Alcool, aviões, motocicletas, barcos, locomotivas, etc.	Material particulado, monóxido de carbono, óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, ácidos orgânicos
Fontes naturais		Materiais particulados, poeiras Gases SO ₂ , H ₂ S, CO, NO, NO ₂ , hidrocarbonetos
Reações químicas na atmosfera Ex. hidrocarbonetos + óxidos de nitrogênio (luz solar)		Poluentes secundários O ₃ , aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos, aerossol fotoquímico, etc.

Fonte: CETESB (1996).

Quando se determina a concentração de um poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores (ser humano, plantas, animais e materiais) como resultado final do processo de

lançamento destes poluentes na atmosfera por suas fontes de emissão e suas interações na atmosfera, do ponto vista físico (diluição) e químico (reações químicas).

O sistema pode ser visualizado conforme mostra a fig. 2.1

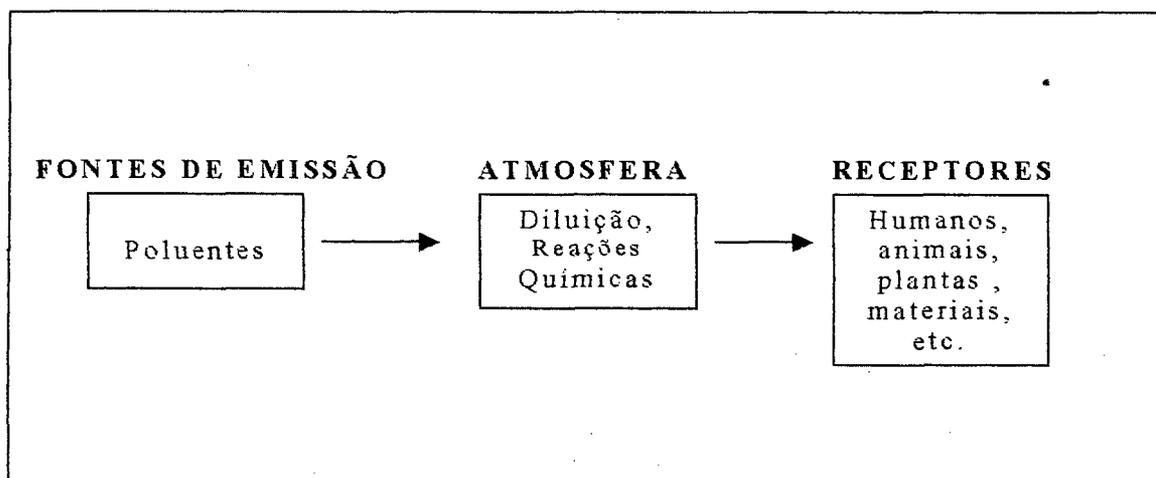


Figura 2.1: Processo de lançamento de poluentes na atmosfera

O importante é frisar que mesmo mantidas as emissões, a qualidade do ar pode mudar em função das condições meteorológicas que determinam a maior ou a menor diluição dos poluentes. É por isso que a qualidade do ar piora durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera vai definir o nível de qualidade do ar, que determina, por sua vez, o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores.

A determinação sistemática da qualidade do ar deve ser, por problemas de ordem prática, limitada a um restrito número de

poluentes, definido em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis.

De uma forma geral, a escolha recai sempre sobre um grupo de poluentes que servem como indicadores da qualidade do ar, consagrados universalmente: dióxido de enxofre (SO_2), poeira em suspensão, monóxido de carbono (CO), oxidantes fotoquímicos expressos como ozônio (O_3), hidrocarbonetos totais e óxido de nitrogênio (NO e NO_2).

A razão da escolha destes parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada à sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente (CETESB, 1996).

2.1.2 – Padrões de Qualidade do Ar

Um padrão de qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garante a proteção da saúde e de bem estar das pessoas. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada.

São estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários.

São padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, quando ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo.

São padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar das populações, assim como o mínimo prejuízo à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentrações de poluentes, constituindo-se em metas de longo prazo. O objetivo do estabelecimento de padrões secundários é criar uma base para uma política de prevenção da degradação da qualidade do ar.

Os parâmetros regulamentados são os seguintes: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio (CETESB, 1996).

As unidades de medida utilizadas para se obter a concentração de poluentes são função do peso das partículas por unidade de volume de ar (mg/m^3 , ug/m^3) ou o número de partículas por milhão de partes de mistura (ppm) (CETESB, 1985).

Como a resistência do homem à poluição depende obviamente da intensidade da poluição e/ou do tempo de exposição a ela, daí vem que a medição da concentração de poluentes (seja em unidades de peso por unidade de volume do ar ou em número de partículas por milhão de partes de mistura) precisa considerar o tempo de exposição ao poluente, originando, pois, dois padrões da qualidade do ar. O primeiro considera a poluição despejada continuamente no ar. O segundo considera a poluição intensa e crítica limitada no tempo (Martins, 1996).

Os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90 são apresentados no quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Padrões de Qualidade do Ar

POLUENTES	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO UG/M ³	PADRÃO SECUNDÁRIO UG/M ³	MÉTODOS DE MEDIÇÃO
Partículas totais em suspensão	24 horas(1)	240	150	Amostragem de grandes volumes
	MGA(2)	80	60	
Dióxido de enxofre	24 horas(1)	365	100	Pararosanilina
	MAA(3)	80	40	
Monóxido de carbono	1 hora(1)	40.000 35ppm	40.000 35ppm	Infravermelho não dispersivo
	8 horas(1)	10.000 9ppm	10.000 9ppm	
Ozônio	1 hora (1)	160	160	Quimiluminescência
Fumaça	24 horas(1)	150	100	Refletância
	MAA(3)	60	40	
Partículas inaláveis	24 horas(1)	150	150	Separação Inercial/Filtração
	MAA(3)	50	50	
Dióxido de nitrogênio	1 hora MAA(3)	320	190	Quimiluminescência
		100	100	

Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano (1)

Média geométrica anual (2)

Média aritmética anual (3)

Fonte: CETESB (1996)

2.1.3- .Processo de Concentração de Poluentes

O processo de concentração de poluentes atmosféricos inicia-se com o lançamento de poluentes no ar, geralmente gases, podendo ser também materiais particulados. Quando transportados pelos deslocamentos de massas de ar e dependendo de outras condições de dispersão, esses poluentes passam a ter uma maior ou uma menor participação na composição da atmosfera de uma região. Desta forma,

do desequilíbrio entre emissão e a dispersão de poluentes é que se forma a poluição, que se expressa pelos seguintes fatores: intensidade, continuidade e efetividade.

Por intensidade entenda-se a quantidade de poluente em uma amostra de ar de uma região; por continuidade entenda-se o tempo de permanência desses poluentes na composição do ar e, por efetividade entenda-se o efeito negativo sobre o meio ambiente onde incluímos obviamente os seres vivos, principalmente o homem (Chiquetto, 1991; Bezerra, 1988; Ribeiro, 1977; Martins, 1996).

A poluição do ar em relação ao transporte concentra-se nas grandes cidades e é causada principalmente pelo tráfego urbano, sendo maior nas interseções.

2.1.4-Tráfego de Veículos Motorizados como Fontes de Emissão de Poluentes

No presente trabalho, nosso interesse é a poluição no ambiente urbano provocada pelos veículos motorizados, em especial, nas interseções. Do ponto de vista da química da atmosfera, os quatro materiais mais indesejáveis, emitidos pelos canos de escapamento dos veículos, são: o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos, os óxidos de nitrogênio e o material particulado.

Monóxido de carbono (CO)- Resulta da oxidação parcial do carbono, regida pela quantidade de oxigênio disponível no momento da queima. Quando inalado, combina com a hemoglobina do sangue, diminuindo a capacidade de oxidação do cérebro, coração e outros órgãos. Pode provocar tonturas, dor de cabeça, sono e redução dos

reflexos. A emissão contínua de CO, em ambiente fechado ou pouco ventilado, pode resultar num acúmulo capaz de provocar a morte.

Altos índices de monóxido de carbono em áreas de intenso trânsito de veículos têm sido apontados como causas adicionais de acidentes de tráfego (CETESB, 1996).

Dióxido de Enxofre (SO₂)- Os efeitos dos gases na saúde humana estão intimamente associados à sua solubilidade nas paredes do aparelho respiratório, fato este que governa a quantidade do poluente capaz de atingir as porções mais profundas do aparelho respiratório.

Existem evidências de que o dióxido de enxofre agrava as doenças respiratórias preexistentes e, também, contribui para seu desenvolvimento. Sozinho, produz irritação no sistema respiratório, e absorvido em partículas pode ser conduzido mais profundamente podendo produzir danos aos tecidos do pulmão.

Estudos epidemiológicos e clínicos mostram que certas pessoas são mais sensíveis ao dióxido de enxofre que outras. Exposições prolongadas a baixas concentrações de dióxido de enxofre têm sido associadas ao aumento de mortalidade cardiovascular em pessoas idosas.

Hidrocarbonetos (HC)- Terminologia própria para a emissão de veículos alimentados exclusivamente a gasolina ou diesel. Trata-se de pequenas quantidades de combustíveis que não queimaram ou terminaram o processo de combustão, apenas parcialmente oxidados.

Diversos HC podem causar dano celular sendo que alguns, como o benzeno, são considerados carcinogênicos e mutagênicos.

Participam das reações de formação do “smog” fotoquímico que além da geração de oxidantes como o Peroxiacetilnitrato, reduz a visibilidade.

Óxido de nitrogênio (NO_x)- Resulta da combinação do oxigênio e do nitrogênio presentes no ar emitidos pelo motor, em condições de temperatura e pressão altas. Os NO_x podem provocar irritação e constrição das vias respiratórias, diminuem a resistência orgânica às infecções, participam no desenvolvimento de doenças pulmonares e, à semelhança dos hidrocarbonetos, têm parte ativa nas reações de formação do “smog” fotoquímico. Em contato com o vapor de água, o dióxido de nitrogênio se transforma em ácido nítrico.

Material particulado (MP)- Trata-se de partículas diminutas que resultam da queima incompleta de combustíveis e de seus aditivos e do desgaste de pneus e freios.

Devido ao diminuto tamanho, da ordem de 0,5 μm , podem atingir os alvéolos pulmonares. Dentro dos sintomas relacionados com a inalação de MP, temos alergias, asma, bronquite crônica e agravamento de sintomas produzidos por outros poluentes, em especial, os óxidos de enxofre.

2.1.5 –Capacidade Ambiental

Observa-se que o impacto dos poluentes emitidos pelos veículos motorizados sobre a saúde do homem é alarmante. Nas grandes cidades do mundo o tráfego de veículos é a maior fonte de poluição e aproximadamente na metade delas, é a única fonte importante (Who, 1992; Carneiro, 1998).

Percebendo o significativo impacto que o tráfego está produzindo em cada indivíduo, em cada comunidade, os engenheiros de tráfego estão se preocupando com a compatibilidade do tráfego veicular e o meio ambiente, isto é, que a organização da programação de ruas e estradas seja compatível com a qualidade de vida das pessoas. É assim como Buchanan (1963) apresenta um novo conceito no planejamento de transporte em relação a capacidade das vias. Buchanan (1963) procura compatibilizar a capacidade física da via com a capacidade ambiental.

Entende-se por capacidade ambiental “a capacidade que uma via ou área possui para acomodar veículos estacionados e/ou em movimento, em relação à necessidade de garantir determinados padrões mínimos de qualidade de meio ambiente” (Santos, 1988). Ou também, “Capacidade ambiental vem a ser a quantidade máxima global de poluentes que pode ser emitida na atmosfera de uma área urbana, no momento crítico - função do fluxo de tráfego e das variáveis de dispersão - segundo a capacidade de suporte/saturação do ar, que por sua vez é prevista pelos padrões específicos de emissão veicular unitária” (Chiquetto, 1991; Martins, 1996).

Nestas definições está sendo considerado o próprio processo de concentração de poluentes ou formação de poluentes, que por sua vez, compreendem outros dois processos: emissão e dispersão.

Os fatores que influenciam na capacidade ambiental urbana sob a ótica da contaminação atmosférica provocada pela circulação de veículos automotores, segundo Crompton e Gilbert (1978), são:

- largura e condições físicas das vias (lay-out);
- densidade de tráfego;
- quantidade de estacionamentos e locais para carga/descarga;
- características do uso do solo;

- fluxo e tipo de pedestre;
- formas de controle de tráfego nas interseções e sua capacidade.

O último fator citado, considera-se o mais importante deles, já que a maior poluição de uma via ocorre nas interseções, seja pela ausência de sinal ou pela programação inadequada de um semáforo.

2.1.6 – Variáveis de Emissão de Poluentes Urbanos

As principais variáveis que participam no processo de emissão de poluentes na zona urbana segundo Martins (1996) são:

- características da frota (variáveis: tamanho, peso, potência, número de carburadores, idade, tipo de injeção de combustível, presença ou não de catalisadores, tipo de motor, etc.);
- tipo de composição do combustível (variáveis: qualidade de impureza, quantidade de chumbo, etc.);
- características do sistema de tráfego (variáveis: controle nas interseções, número de faixas de rolamento, tempo de semáforo, facilidades para estacionamento, velocidade média, número de frenagens, comportamento do motorista, aceleração/desaceleração, regulagem e manutenção dos veículos, etc.);
- geometria da via (variáveis: largura, inclinação, curvas, quantidade de redutor de velocidade, qualidade do revestimento das vias, etc.).

Cada uma dessas variáveis representa um problema. Na presente proposta de tese será abordada a variável controle nas interseções sinalizadas com semáforo, onde será analisado o tempo de ciclo do semáforo, buscando reduzir acelerações/desacelerações. A mudança do modo de operação, função das características do sistema de

tráfego, alteram os fatores de emissão. Estas mudanças são mais acentuadas nas interseções, mais ainda com a presença de um semáforo programado inadequadamente.

O quadro 2.3 mostra a taxa de emissão de vinte e sete veículos americanos, ano-modelo 1975, em vários modos de operação. Percebe-se que a velocidade de cruzeiro em torno de 50km/h é menos impactante (Martins, 1996).

Quadro 2.3 – Taxa de Emissão de 27 Veículos Americanos, Ano, Modelo e Modo de Operação.

MODO DE OPERAÇÃO	VELOCIDADE (KM/H)			EMISSIONES (PPM)		
	INICIAL	FINAL	TAXA (M/S ²)	CO	HC	NO _x
Veloc. De Cruzeiro		25		5,30	0,27	0,13
		50		1,87	0,26	0,56
		100		3,40	0,25	3,73
Desaceleração	50	0	1,0	7,46	0,33	0,36
	25	0	0,8	8,30	0,31	0,12
	50	25	0,7	5,63	0,25	0,39
	100	50	0,7	4,89	0,50	1,84
Marcha lenta				7,85	0,36	0,04
Aceleração	0	50	1,1	17,84	0,8	1,84
	0	25	0,8	12,77	0,52	1,17
	25	50	0,6	9,14	0,55	1,17
	50	100	0,8	51,20	1,90	4,93

Fonte: Horowitz, J. in Martins 1996

2.1.7 – Fatores de Dispersão de Poluentes

Ainda que fossem mantidas constantes as emissões de poluentes em uma determinada região, a qualidade do ar poderia mudar em função das condições de dispersão, portanto, pode-se concluir que a percepção da poluição é a resultante da combinação entre emissão e dispersão de poluentes, ou seja, da concentração de poluentes (Martins, 1996).

Os fatores que mais influenciam no processo de dispersão de poluentes são: Tipos de construção e obstáculos que margeiam as vias, condições topográficas, condições climáticas, distâncias da fonte de emissão ao receptor e propriedades físico-químicas do próprio poluente (Bezerra, 1988; Martins, 1996). É importante destacar que nenhum desses fatores funcionam isoladamente no mundo físico, mas é da combinação deles que se processa a difusão de poluentes. Obviamente que um ou outro, como o deslocamento do ar, podem ter maior participação ou participação direta no fenômeno de dispersão, mas ainda assim, tanto a topografia quanto a temperatura, e mesmo o lay-out da via podem alterar o próprio deslocamento do ar (Martins, 1996).

Conceitualmente, uma corrente de ar é a soma de um movimento médio do ar (vento médio) e um movimento turbulento. Quando um poluente é liberado na atmosfera, o vento médio transporta-o, enquanto a turbulência dispersa-o horizontal e verticalmente na direção do vento médio. A capacidade da dispersão na atmosfera é determinada, então, pelo efeito de turbulência (Martins, 1996).

Interessa, portanto, no estudo do fenômeno da dispersão atmosférica, o conhecimento desse efeito. Vários parâmetros

meteorológicos podem representar a turbulência, dentre os quais a estabilidade atmosférica.

Alguns autores procuram explicar o conceito de estabilidade atmosférica utilizando valores quantificáveis (Maughan et al., 1982). Essa quantificação resume-se à classificação de graus de estabilidade. Dentre os métodos de classificação da estabilidade atmosférica temos quatro: o de Pasquill, o de Klugg/Marnier, o do gradiente vertical de temperatura e o da flutuação do vento (Martins, 1996).

2.1.8- Modelos de Dispersão Atmosférica

Freitas (1991), faz uma divisão dos modelos de dispersão em quatro grupos, conforme quadro 2.4.

Modelo de dispersão baseado na teoria da pluma gaussiana.- A experiência do PET/COPPE (Freitas, 1991 e Chiquetto, 1991) identifica alguns atributos especiais aos modelos da teoria da pluma gaussiana, suficientes para serem recomendados para estudos ambientais (Martins, 1996) e são :

- base suficiente e razoavelmente simples para se proceder a análise da dispersão dos poluentes atmosféricos derivados de fontes de emissão contínua;
- considera-se que a fonte de emissão em estudo está localizada próxima ao receptor, o que no caso da poluição proveniente do tráfego é verdadeiro.

Percebe-se também na literatura estrangeira uma maior quantidade de modelos de dispersão baseados na teoria da pluma gaussiana (Martins, 1996). Este tipo de modelo admite que a

Quadro 2.4 - Modelos de Dispersão- características e campos de aplicação

GRUPOS	CARACTERÍSTICAS	TIPOS	GRAU DE DETALHE	TEMPO DE COMPUTAÇÃO	RESOL. ESPACIAL	RESOL. TEMPORAL	CAMPO DE APLICAÇÃO
MODELO DE REGRESSÃO	O efeito de turbulência é desconsiderado.	Proporcional	Pequeno	Nenhum	Nenhuma	Desprezível	Problemas
	Estabelecem as relações entre os níveis de concentração e as variáveis que irão produzir as concentrações.	Empírico	Pequeno	Nenhum	Nenhum	Desprezível	Testes de modelos complexos
MODELO DE DISPERSÃO SIMPLES	Simplificações da teoria dá difusão de poluentes.	Box	Pequeno	Nenhum	Nenhum a desprezível	Nenhuma	Problemas Gerais
	Consideram: emissão, velocidade e direção do vento e estabilidade atmosférica	Atmospheris Turbulence and diffusion laboratoy	Pequeno	Nenhum a pequeno	Desprezível	Desprezível a boa	Testes de modelos complexos
MODELO DA TEORIA GAUSSIANA	Consideram que poluentes tem uma distribuição do tipo gaussiana, com turbulência homogênia.	Pluma gaussiana	Grande	Pequeno a extensivo	Boa	Boa	Pesquisas
	Desconsideram as atividades fotoquímicas dos poluentes	Puff Gaussiana	Grande	extensivo	Boa	Boa	Produções detalhadas
MODELOS DA TEORIA DO GRADIENTE DO TRANSPORTE	Admitem que o processo de dispersão de poluentes obedece uma taxa que é proporcional à magnitude do gradiente de concentração	Analfico de Dispersão	Grande	pequeno	Boa	Boa	Atividade Química dos poluentes
		Número de dispersão	Grande	extensivo	Boa	Boa	Pesquisa

Fonte: Ziv in Freitas (1991).

dispersão de poluentes tem uma distribuição normal (ou gaussiana) nas direções horizontal e vertical.

Santos (1985), aponta que a distribuição da concentração gaussiana não é tão adequada para a difusão vertical, assim como é para a difusão horizontal, mas, ainda assim, na prática, a função gaussiana pode representar a distribuição vertical, dada a necessidade de simplificação do fenômeno para tornar a metodologia de análise e previsão mais operacional (Martins 1996).

Assim, pode-se mostrar que a concentração de um poluente num ponto (x,y,z), gerada por uma fonte a uma altura h, pode ser estimada pela equação (2.1), cuja representação esquemática é mostrada na figura 2.2.

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp[-1/2 * \exp(Y/\sigma_y)^2] \left\{ \exp[-1/2 \left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2] + \exp[-1/2 \left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2] \right\} \quad (2.1)$$

Onde:

C= Concentração do poluente (g/m³)

Q= Taxa de emissão da fonte (g/s)

U= Velocidade média do vento.

h= Altura efetiva da fonte de emissão

σ_y e σ_z , são os desvios padrão das concentrações nas direções y e z respectivamente (m).

y= Distância do receptor à fonte emissora na direção y (m).

z= Distância do receptor à fonte emissora na direção z (m).

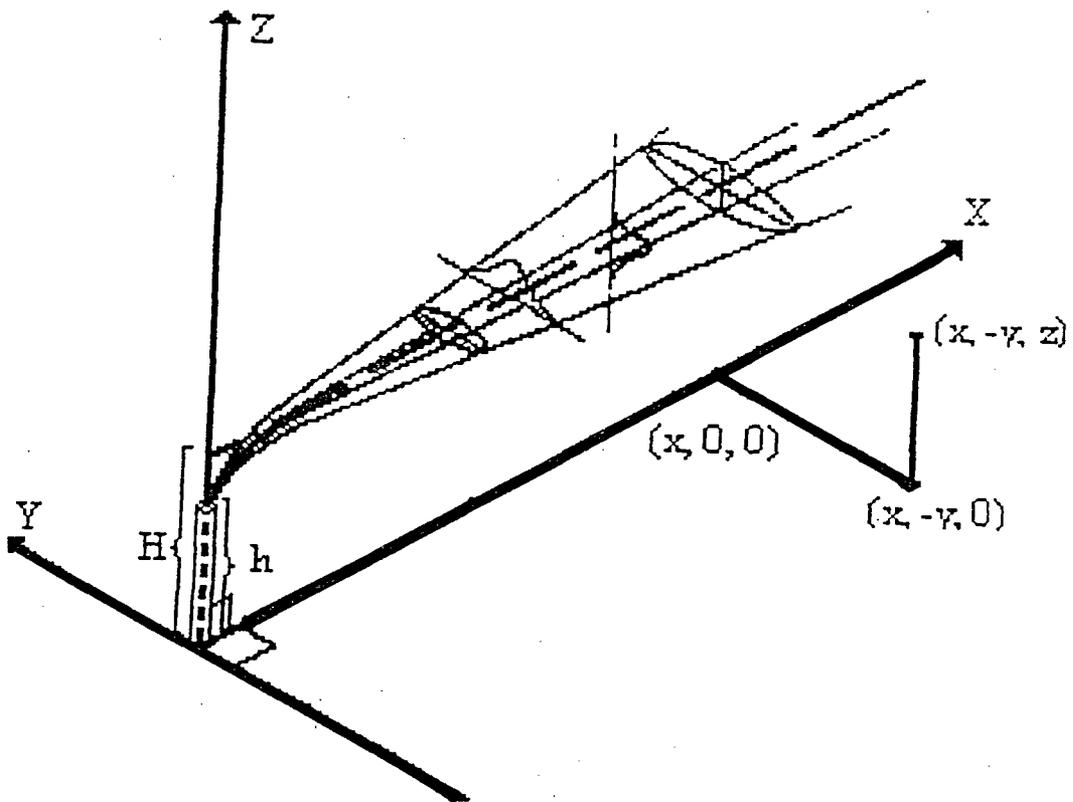


Figura 2.2: Sistema de coordenadas mostrando as distribuições gaussianas nas direções horizontal e vertical. extraído de Cohn e Mevov (1982)

Para poluição gerada pelo tráfego de veículos, considera-se a emissão ao nível do solo ($z=0$), já que os poluentes são geralmente decorrentes do sistema de escapamento do veículo e, portanto, a variável h na equação (1) assume o valor zero, (considera desprezível a distância do escapamento ao solo) Inclui-se, também, um fator multiplicador "T", que corresponde ao somatório das fontes, isto é, o volume do tráfego. A expressão (1) se reduz a:

$$C = QT/2\pi\sigma_y\sigma_zU. \exp -y^2/2\sigma_y^2 \quad (2.2)$$

Resta, então, na fórmula acima, a necessidade de conhecimento dos desvios padrões σ_y e σ_z , que podem ser encontrados em Pasquill (1974) e em Freitas (1991).

2.2- CONTROLE DE TRÁFEGO EM CRUZAMENTOS SEMAFORIZADOS.

O controle de interseções através de semáforos será utilizado como parte da metodologia, já que nosso objetivo é minimizar o atraso e a poluição utilizando este tipo de controle.

O controle de tráfego em cruzamentos semaforizados é entendido como o conjunto de ações tomadas por um mecanismo que mediante informações sobre o tráfego, que solicita a interseção e alterna o direito de passagem, oferece aos veículos uma circulação ótima segundo algum critério.

Define-se como critério o aspecto particular que orienta a formulação da política ótima (Lustosa, 1981). Os critérios mais importantes no caso dos planos de semaforização são:

- minimização do atraso médio por veículo;
- minimização do tempo de viagem;
- minimização do consumo de combustível;
- minimização do número de paradas;
- minimização da saturação.

No presente trabalho, será utilizado um novo critério que é a minimização da poluição, juntamente com o critério de mínimo atraso, produzido pelos veículos que passam pela interseção sinalizada.

2.2.1 - Objetivo Geral do Controle de Tráfego nos Cruzamentos Semaforizados-

O objetivo geral do controle de tráfego nos cruzamentos semaforizados é a organização do escoamento de veículos e pedestres. Texier (1978), define objetivos básicos:

- a principal finalidade de um semáforo numa interseção é garantir segurança aos motoristas e pedestres;
- otimizar os diferentes usos da rede viária, diminuindo o tempo de viagem e aumentando a capacidade;
- controlar o tráfego em condições saturadas;
- atuar sobre a própria demanda.

2.2.2 - Planos de Sinalização Semafórica

O problema do estabelecimento de um plano semafórico é, em sua forma geral, o de encontrar os valores do ciclo e das repartições

verde e vermelho de cada fase, de forma a melhor atender os critérios preestabelecidos.

Como já sabemos que o valor do ciclo guarda um compromisso com o atraso dos veículos e com a capacidade da interseção, pois a medida que diminui o tempo de ciclo o atraso tende a diminuir até um valor ótimo (ou mínimo), a partir do qual o atraso volta a crescer. No entanto, a capacidade da interseção também decresce, com a diminuição do tempo de ciclo.

A diminuição do atraso é explicada, pelo menor tempo de espera até o verde do ciclo seguinte. Diminuição da poluição é explicada pela menor quantidade de poluente (CO) emitido durante um ciclo.

A otimização de uma função exige maior complexidade dos métodos e tem como objetivo buscar a melhor solução, segundo o critério adotado.

2.2.3 - Aspectos Operacionais

Existem basicamente duas estratégias de controle dos semáforos, de acordo com a sua programação: o controle a tempo fixo e o controle atuado pelo tráfego.

2.2.3.1 - Controle a Tempo Fixo

Planos de tempo fixo são aqueles que são acionados segundo uma tabela de horários que não é modificada pelos padrões de tráfego. Nesta estratégia de controle, a programação marcada previamente na máquina controladora, não muda ao longo do tempo (CET-SP, 1978). Neles, o tempo de ciclo é constante e a duração e os

instantes de mudança dos estágios são fixos em relação ao ciclo para o período considerado.

Os controladores a tempo fixo apresentam as seguintes características:

- são equipamentos simples e de custo relativamente baixo,
- podem facilitar a coordenação de semáforos adjacentes com maior eficiência do que os controladores atuados pelo tráfego, devido à constância do tempo de ciclo e de sua partição de verdes,
- não dependem dos detectores veiculares e, portanto, não são afetados por anomalias no detector como, por exemplo, no caso de obra na via ou de veículos estacionados sobre os mesmos,
- apresentam resultados satisfatórios em cruzamentos, onde os padrões são relativamente estáveis e têm um comportamento cíclico e previsível,
- -considerando que este controle não modifica os tempos semaforicos em função de flutuações do tráfego, pode causar atrasos excessivos para veículos e pedestres fora das condições previamente programadas.

2.2.3.2 - Controle Atuado pelo Tráfego.

A característica principal desta estratégia de controle é que os tempos semaforicos variam de acordo com as flutuações do tráfego que ocorrem no cruzamento. Tais flutuações são registradas através de detectores conectados ao semáforo. Este controlador sofre ajustes contínuos na duração do ciclo e na divisão dos tempos de verde para atender às solicitações do tráfego, o que muitas vezes torna-se uma tarefa altamente complexa. Este tipo de controlador apresenta um elevado custo de implantação, manutenção e operação (Vincent e Peirce, 1988).

2.2.4-Modo de Operação Isolada

Neste caso o controle dos movimentos de tráfego baseia-se nas condições existentes no próprio cruzamento, não sendo considerado eventuais interferências exercidas pela operação dos semáforos adjacentes.

No modo de operação isolada são utilizados os dois tipos de controladores descritos na seção anterior, para operar um cruzamento de forma isolada: tempo fixo e atuado pelo tráfego. Adota-se aquele que, dentre os recursos disponíveis, melhor atender aos objetivos propostos, como por exemplo a redução de acidentes, a minimização de atrasos e a poluição.

2.2.5- Regulagem de Semáforos em Cruzamentos Isolados

A regulagem de um semáforo em um cruzamento isolado, consiste em determinar os seguintes parâmetros de controle: tempo de ciclo e as porções de verde de cada fase. Define-se como parâmetro a variável cuja modificação altera a estrutura do controle. Os valores dos parâmetros devem ser aqueles que otimizem o serviço. A seguir são apresentadas algumas características destes parâmetros, visando auxiliar a avaliação da situação e a seleção dos planos mais adequados às circunstâncias.

2.2.5.1 - Tempo de Ciclo Ótimo

Para cada situação específica, existe um tempo de ciclo que melhor satisfaz as necessidades. Assim, nos locais e/ou nos períodos de maior solicitação, espera-se que seja necessário fornecer um

maior tempo de ciclo para aumentar a capacidade de escoamento e reduzir os congestionamentos. Em condições menos críticas, um tempo de ciclo menor pode ser suficiente.

No entanto, verifica-se que quanto maior é o ciclo, maior é o tempo de vermelho e, conseqüentemente, o atraso uniforme. Define-se atraso uniforme como sendo o retardamento sofrido pelos veículos que chegam durante o tempo de vermelho e são obrigados a parar (Webster, 1958). Um tempo de espera muito grande contribui na formação de filas com maior número de veículos, portanto, tem-se maior número de acelerações e desacelerações e maior tempo de veículos parados com motor ligado. Todos estes fatores contribuem no aumento de poluentes do ar.

Diminuindo-se o tempo de vermelho, através da redução do ciclo, o tempo de espera torna-se proporcional, tendência que permanece até um certo valor do ciclo. Para ciclos inferiores a este valor, o tempo necessário para o veículo se deslocar passa a ser significativo diante do tempo de verde, o que implica um aumento de tempo de espera.

2.2.5.2 - Porção de Verde

No presente trabalho, busca-se dimensionar a porção de verde em cada fase, de modo a minimizar o atraso e a poluição no cruzamento. Minimizar o atraso permite organizar a operação do cruzamento, evitar reações no comportamento dos motoristas e pedestres; minimizar a poluição permite contribuir na qualidade do ar, logo, na saúde das pessoas. Deve-se, portanto, identificar qual a porção de verde que, além de não penalizar demasiadamente qualquer dos movimentos, minimize o atraso global no cruzamento. Buscando, assim, uma porção de verde ótima.

2.2.6 - Planos Semafóricos para Semáforos Operando a Tempo Fixo e Modo Isolado

Estes tipos de planos serão utilizados na presente proposta de tese. Estes planos são constituídos pelo tempo de ciclo ótimo, os tempos de verde de cada fase e os tempos de amarelo. O tempo de ciclo ótimo de um determinado cruzamento é calculado em função das condições de tráfego na área e da capacidade das aproximações. Os tempos de verde de cada fase e os tempos de amarelo são calculados em função do tempo de ciclo ótimo. Nestes planos, o tempo de ciclo é constante para o período considerado e a duração e os instantes de mudança dos estágios são fixos em relação ao ciclo.

2.3 – ANTECEDENTES DO PROBLEMA

Na presente seção, serão apresentadas algumas pesquisas relacionadas com a poluição do ar provocada pelo trânsito. Cada uma delas considera técnicas e cálculos próprios, têm formas distintas de enfrentar o problema. Mas, todas buscam minimizar o problema da poluição, procurando sempre explicar melhor as causas. Estes métodos serão descritos como antecedentes para a presente proposta de tese.

2.3.1 – Método de Matzoros (1992)

Matzoros apresenta a descrição detalhada de um modelo que prediz emissões de poluição do ar em estradas urbanas. Sua pesquisa está baseado em poluição, medida em concentrações de CO₂, já que

este é considerado o poluente mais importante do trânsito, ver quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Dados Do Modelo De Emissão

TAXA DE EMISSÃO DE VEÍCULOS(GR/MIN)				
Modo De Operação	CO	HC	NO _x	RATE (M/S ²)
Cruzeiro	5,08	0,95	1,71	
Desaceleração	8,34	2,45	1,22	1,1
Parado	3,00	0,50	0,03	
Aceleração	10,00	1,34	2,05	2,8
Rastejando*	5,00	1,05	1,48	

*Só aplicado em cruzamentos sinalizado com placa (Matzoros, 1992)

O modelo detecta diferenças nas emissões de poluentes, entre modos de operação e tipos de controle de interseções, como é mostrado a seguir.

As distribuições de emissões, segundo o modelo, não são constantes ao longo de uma estrada, mas seguem uma distribuição, cujo pico está perto da interseção, pelo que se pode afirmar que a maior quantidade de poluentes são emitidas nas interseções.

As distribuições das emissões para ruas com semáforo e com placa são semelhantes, cujo pico registra-se na linha de parada, porém, as ruas com placa apresentam menor poluição para fluxos baixos.

Matzoros mostra que nas ruas com semáforo a concentração de CO aumenta em função do receptor e do fluxo, ver figura 2.3. Os receptores que estão perto da linha de parada registram maior

concentração de CO, do que os que estão longe, como é o caso do receptor 5, quando o fluxo veicular é menor. Quando o fluxo veicular é maior, os receptores que estão longe apresentam maior concentração de CO, caso do receptor 4 e 5, ver figuras 2.3 e 2.4. Na figura 2.4, observa-se que as concentrações de CO aumentam bruscamente, quase o dobro em comparação com a figura 2.3, quando os fluxos veiculares estão acima da capacidade da via, pois neste tipo de controle existem maior número de acelerações e desacelerações, quando o fluxo é maior que a capacidade da via.

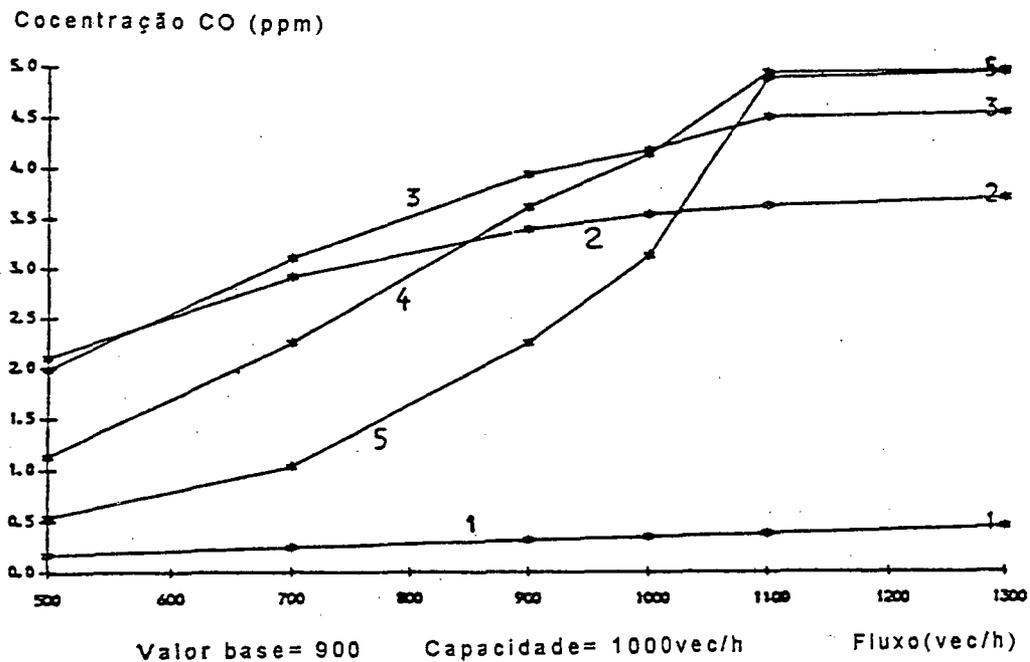


Figura 2.3: Mostra a relação entre a concentração de CO dos cinco receptores apresentados na figura 2.5 e os fluxos veiculares, em um intervalo de 500 a 1,300 v/h. Em um cruzamento com semáforo.

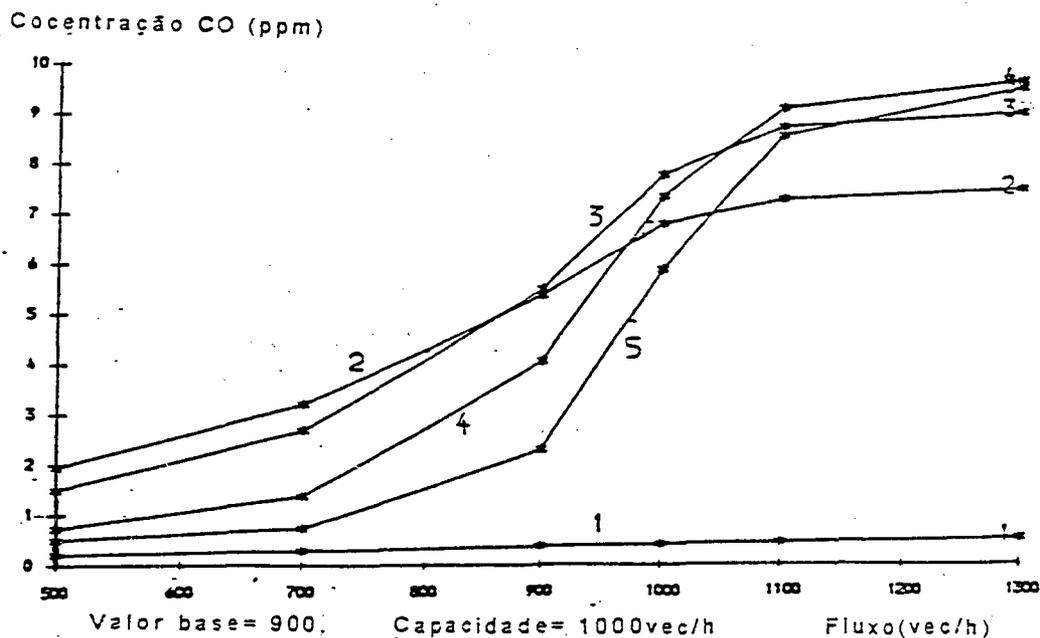


Figura 2.4: Mostra a relação entre a concentração de CO dos cinco receptores e os fluxos veiculares no intervalo de 500 a 1.300 v/h. Num cruzamento com placa.

É importante destacar que as emissões, segundo Matzoros, não são constantes ao longo da via, como foi dito anteriormente, fato que pode ser observado nas figuras 2.3 e 2.4, onde são apresentados 5 receptores colocados segundo a figura 2.5. Os receptores 2 a 5 estão atrás da linha de parada, e o receptor 1 está na frente da linha de parada. Os receptores que estão atrás e mais perto da linha de parada, registram maior concentração de poluentes que os receptores que estão mais longe da linha de parada, quando os fluxos são menores, e vão aumentando conforme aumenta o fluxo veicular. Isto é, devido ao aumento do fluxo veicular, aumenta o tamanho da fila, alcançando os

receptores mais distantes como é o caso dos receptores 4 e 5. O receptor 5 registra um aumento brusco quando o fluxo supera a capacidade da via. O receptor que está na frente da linha de parada tem captação menor que os anteriores.

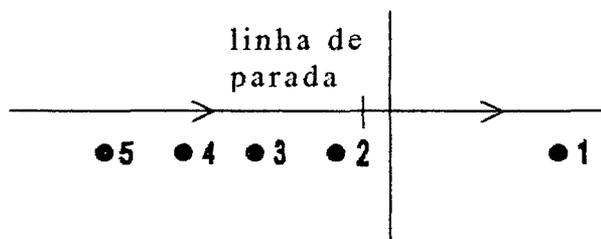


Figura 2.5: Processão dos cinco receptores

Matzoros também mostra os efeitos de cada modo de operação na emissão de CO em relação ao fluxo veicular. Observa-se na figura 2.6 um aumento brusco de emissão de CO, quando o fluxo está acima da capacidade, sendo a mudança mais brusca no modo operacional de aceleração, isto é, para o caso de interseção sinalizada com semáforo. Na figura 2.7, também apresenta-se para ruas sinalizadas com placa, o efeito da emissão por causa dos fluxos acima da capacidade, que é semelhante ao caso anterior, porém, neste caso os aumentos são mais altos, pois conforme aumenta o fluxo aumenta o tamanho da fila e muitas vezes sem controle, provocando assim maior emissão de CO pelo aumento de veículos, isso é devido à aceleração e/ou desaceleração ou paradas com motor ligado.

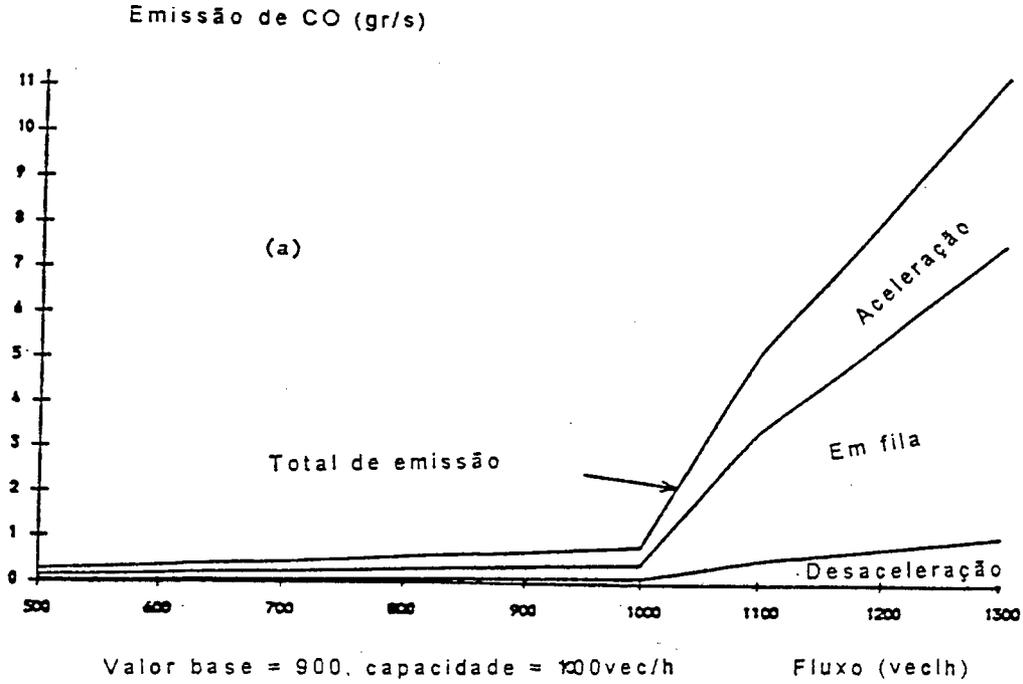


Figura 2.6: Relação entre a concentração de CO e os modos de operação, para fluxos variados. Cruzamento com semáforo.

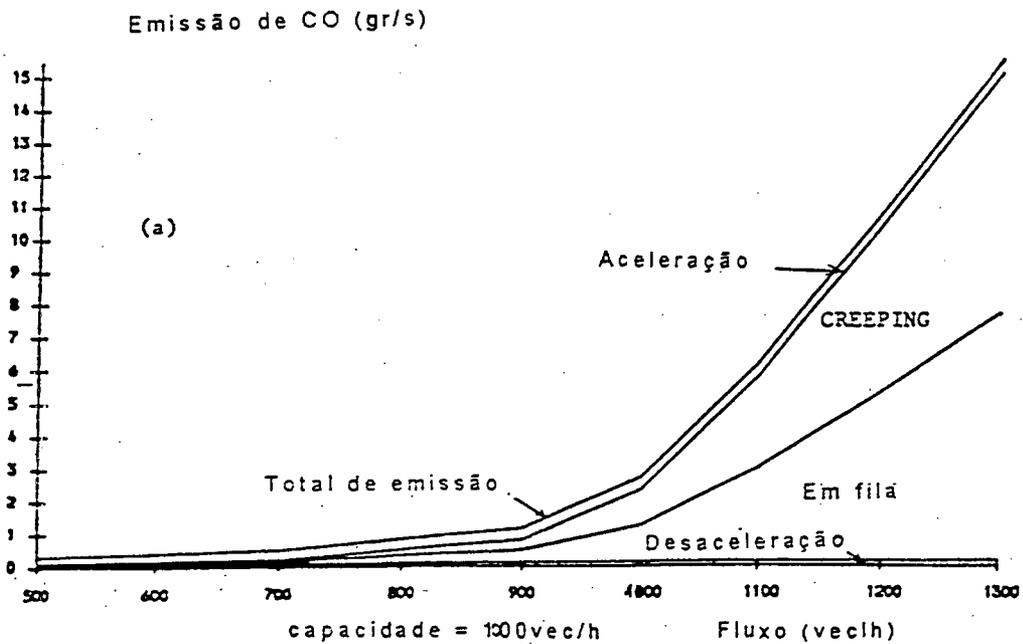


Figura 2.7: Relação entre concentração de CO e modos de operação, para fluxos variados. Cruzamento com placa.

Em relação ao tempo de ciclo, Matzoros afirma que é importante, em uma interseção sinalizada, a duração do tempo de ciclo e seu efeito na variação das emissões de CO. Matzoros faz uma comparação de emissão de CO para três tempos de ciclo (60, 120 e 180 segundos) e conclui que os tempos de ciclo menores produzem maior poluição. Este fato acontece se trabalharmos com o receptor 2. Portanto, para fazer uma pesquisa desta natureza, é preciso definir previamente a posição do receptor, e logo fazer as medições.

Matzoros afirma que para diferentes modos de operação e diferentes tempos de ciclo a emissão de poluentes é, também, diferente, sendo que, a mais dominante em termos de causa de emissão de CO é a aceleração; e a mínima é a desaceleração.

Matzoros mostra que quanto maior é o tempo de verde, menor é a poluição. Este efeito é notado nos 4 receptores, exceto para o primeiro receptor, que está na frente da linha de parada, ele permaneceu com uma concentração fixa e baixa poluição.

Para cada modo de operação, Matzoros mostra que as emissões de CO caem quando aumenta o tempo de verde do semáforo, sendo que para aceleração e filas, as quedas são mais bruscas.

Como conclusão da pesquisa desenvolvida por Matzoros (1992), aponta-se a necessidade de determinar um tempo de ciclo ótimo, que permita quantificar a quantidade de poluentes emitidos pelos veículos que passam pela interseção sinalizada. É certo que ciclos maiores produzem menor poluição. Entretanto, é importante determinar até quanto um ciclo pode aumentar, pois quanto maior é o tempo de ciclo, maior é o tempo de vermelho, o que traz como consequência atrasos desnecessários para veículos e pedestres. Além disso, deve ser determinada a localização do receptor que melhor mostre o

problema de emissão. Como já foi mencionado por Matzoros (1992), os receptores devem estar atrás da linha de parada.

2.3.2 – Método de Dennis e Nigel (1996)

Os autores desenvolveram um trabalho sobre os efeitos de escape de emissão dos veículos, provocados pelos sinais semaforicos isolados e coordenados, durante um determinado período de tempo ao longo de uma estrada. Este estudo foi desenvolvido em Londres.

Eles afirmam que a estratégia de controle usada pode ter um efeito importante no congestionamento e escape de poluentes. Portanto, para provar esta afirmação, decidem comparar a estratégia de MOVA (Microprocessador para Otimizar a Atuação de Veículos) para sinais isolados, com os planos de sincronização Ligação por Cabos (CLF) calculados pelo TRANSYT. O local escolhido para a pesquisa foi o km. 6 da A12, com 6 semáforos, nos subúrbios orientais de Londres (ver figura 2.8). Foram coletados dados de 13 dias de funcionamento, durante Outubro 1994, e foram analisados para dar: (a) estimativas dos tempos gastos pelos veículos viajando ao longo da A12; e (b) os pesos de quatro tipos de emissão, tais como: monóxido de carbono hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e gases carbônicos. Para 6 desses dias, os sinais foram controlados em forma isolada pela estratégia MOVA (Vincent *et al.*, 1988) e nos outros sete dias os sinais foram controlados em forma sincronizada com planos de tempo fixo preparados pelo método TRANSYT (Robertson, 1969). A pesquisa desenvolvida apresenta resultados que mostram os méritos de cada estratégia, em termos de mudanças de fila média e das emissões, durante o dia.

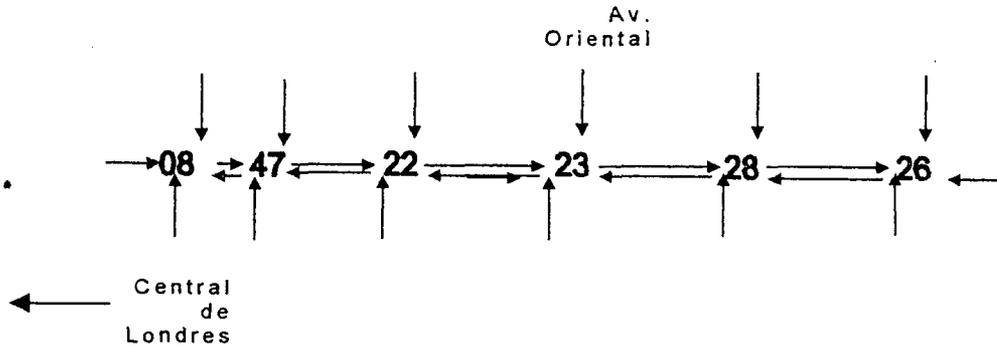


Figura 2.8: Av. Oriental, em Londres, com seis sinais.

O desempenho relativo das duas estratégias de controle esteve medido pelo ajuste de uma linha usando Regressão Linear, entre o tempo gasto numa aproximação, em veículos hora, contra o fluxo total que passa pela interseção, em número de veículos, ambas variáveis, medidas em intervalos de 30 minutos, cuja observação é num período de 1,5 de hora de trabalho por dia, operando na interseção 8 no período de pico AM. A figura 2.9 mostra duas linhas de regressão que melhor ajustam os pontos dados, individualmente para MOVA e para CLF.

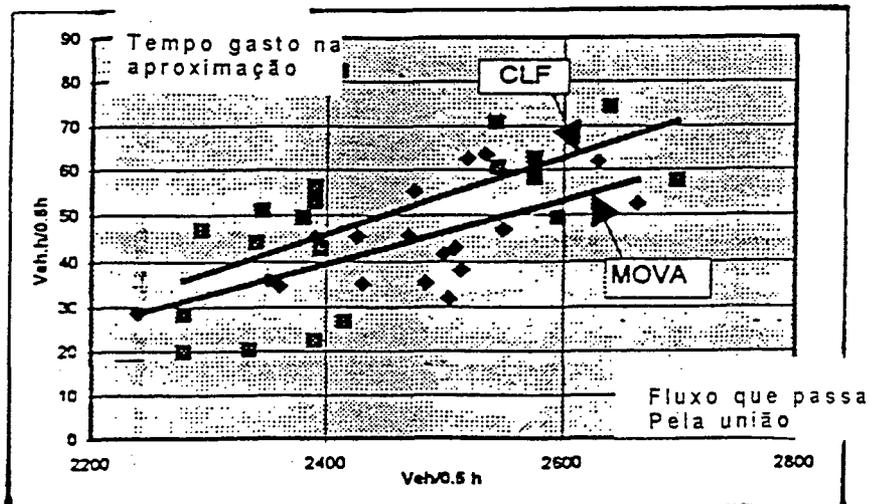


Figura 2.9: Relação do tempo gasto e fluxo veicular que passa pela interseção 8, no período AM.

Estas linhas têm uma inclinação positiva, como era de esperar. O tempo gasto pelos veículos na aproximação da interseção, aumenta com o aumento do fluxo veicular que passa pela interseção. Os méritos relativos da MOVA e CLF devem ser medidos pela separação vertical entre as linhas de regressão de melhor ajuste, cujo coeficiente angular é comum. O resultado dos testes são resumidos no quadro 2.6. As unidades usadas no quadro 2.6 são dadas em mudança da fila média, durante um período de tempo determinado, considerando que os fluxos que passam pela interseção, sejam iguais tanto para MOVA como para CLF. Exemplo, no quadro 2.6, a interseção 8, no período AM, MOVA reduz a fila média comparado com CLF em 15 veículos. O bloco na direita do quadro 2.6, indica se as diferenças entre MOVA e CLF são estatisticamente significativas, onde Y, YY, YYY e N, indicam o grau de significância ao 5%, 2.5%, 1% e não significativo respectivamente.

Quadro 2.6 – Resumo dos Resultados da Av. 12 – Mudanças na Fila Média (MOVA-CLF)

União	PERÍODO DO DIA				ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVO?			
	AM	AO	PO	PM	AM	AO	PO	PM
8	-15	7	10	-33	y	y	yyy	yyy
47	0	3	1	6	N	yyy	y	yyy
22	31	7	8	11	yyy	yy	yy	yy
23	-74	9	28	-14	yy	y	yyy	N
28	-23	5	-1	-45	yyy	y	N	yyy
26	-9	-6	-7	41	N	N	y	yyy
Totais	-90	24	41	-34				

AO, PO, períodos entre pico (manhã e tarde)

AM, PM, períodos de pico (manhã e tarde)

As emissões foram previstas fazendo uso do modelo MODEM. Foram selecionadas 310 amostras para serem processadas pelo Laboratório de Pesquisa de Transporte (TRL), através do modelo MODEM. As amostras escolhidas são representativas para o intervalo de tempo determinado de observação, em cada aproximação da interseção, trabalhando ao longo do dia, operando com MOVA e com CLF.

As emissões previstas pelo MODEM consistem em massa de CO, HC, NOx e CO₂, estas previsões correspondem ao período de amostragem.

Para cada aproximação, de cada interseção calcula-se a regressão linear que possui o melhor ajuste, separadamente para MOVA e para CLF, para estimar como a produção de cada tipo de emissão varia com o tempo, para o veículo que viaja ao longo da aproximação.

Estas massas de emissão são calculadas para um veículo individual em uma aproximação da interseção. Portanto, para calcular a emissão total da aproximação da interseção, é multiplicado a emissão do veículo individual pelo fluxo médio correspondente (fluxo médio de MOVA e CLF). O quadro 2.7 resume estas previsões.

Quadro 2.7 – Previsões das Taxas de Emissão (em kg/h)

PERÍODO	CO		HC		NOX		CO ²	
	MOVA	CLF	MOVA	CLF	MOVA	CLF	MOVA	CLF
AM	480	522	54	57	56	61	4170	4410
AO	293	291	33	32	42	47	2800	2960
PO	310	307	35	34	45	50	3030	3140
PM	474	486	53	53	59	65	4260	4460

O quadro 2.7 mostra que a estratégia isolada MOVA produz ligeiramente menos poluentes que a estratégia de sincronização CLF, mas esse quadro 2.7 esconde alguns diferenças importantes que dependem do tipo de poluente, da interseção, do tempo e do dia da semana.

Como conclusão deste artigo, observa-se que no quadro 2.6, MOVA alcança filas menores que a estratégia CLF, nos períodos de pico de AM (manhã) e PM (tarde), isto é, MOVA alcança menores filas em interseções muito carregadas. Nos períodos entre pico (representados por AO e PO), a estratégia CLF (baseada no TRANSYT, sincronização de planos) produz fila média menores que a estratégia MOVA. O período entre pico é consideravelmente mais longo que a duração do pico permitido, os resultados indicam haver uma redução líquida nas filas médias, no decorrer de todo o dia de funcionamento dos sinais em planos da estratégia CLF, porém, poderiam ser obtidas reduções globais substancialmente maiores em filas, se fosse prático fazer uso da estratégia MOVA nos períodos de pico, e da estratégia CLF nos períodos entre picos.

Foram mostrados também que as emissões CO e HC são correlacionadas com as jornadas de tempo, portanto, tendem a seguir os padrões de mudança nas filas, isto é, maior fila maior poluição. A emissão de NOx e CO₂ não são correlacionadas com as jornadas de tempo, então elas não seguem o mesmo padrão de mudança de fila. Portanto, o CO e HC podem ser utilizados como medidas de poluição em interseções sinalizadas, por seguir os padrões de mudanças nas filas.

A estratégia MOVA em períodos de pico AM e PM reduz a emissão de CO, aproximadamente em 16% e de HC aproximadamente em 14%, comparada com a estratégia CLF. Entre períodos de Pico a

estratégia CLF, prevê reduzir o CO em 3% e HC em 5%, comparada com MOVA.

Com este trabalho pode-se afirmar que os planos modo isolado são mais recomendáveis para fazer previsões de emissões de poluentes nas interseções, já que estes planos reduzem o tamanho da fila média em comparação com os planos sincronizados nos períodos de pico. Menor tamanho da fila, menor número de veículos desacelerando, acelerando e parando com motor ligado. Os planos sincronizados reduzem a fila média mais do que os isolados nos períodos entre picos, mas nestes períodos o fluxo veicular é baixo e muitas vezes não significativo. Também, quanto maior o fluxo veicular, maior será a poluição (Carneiro, 1998).

2.3.3 – Método de Mazen e. Hassounah (1994)

Mazen afirma que se pode estimar a quantidade de emissão de poluentes utilizando a quantidade de consumo de combustível, criando fatores de conversão, mas este processo é muito complexo, portanto, deve-se ter muito cuidado. O uso de fatores simples para converter consumo de combustível e estimar emissões de poluentes, pode não ser tão possível, exemplo CO e HC são produtos de processo de combustão incompleta dentro da máquina, por outro lado, a emissão de CO₂ é um produto de combustão completa, então pode ser assumido que a massa de CO₂ emitida por um veículo, é diretamente proporcional ao combustível usado pelo veículo. Porém, a princípio, o CO e HC aumentam com o consumo de combustível. Isto pode ser contrastado com emissões de NOx, que provavelmente diminuem com o aumento de consumo de combustível. Emissões de NOx, são o resultado de reações de altas temperaturas entre nitrogênio atmosférico e oxigênio da máquina. Finalmente, pelas

contradições descritas deve-se ter muito cuidado quando se faz previsões utilizando consumo de combustível.

2.3.4 - Pesquisa realizada por Michael, Bull e Zimmann (1997)

Estes pesquisadores apresentam uma valiosa contribuição através da comparação de três fontes de dados sobre emissões: DMRB(Manual para Estradas e Pontes), MODEM (Modelo de Emissão e Consumo em Áreas Urbanas)e HB-EFA (Manual Alemão de Fatores Emissão para Tráfego de Estradas). Nestas fontes, os dados estão disponíveis para diversos usuários interessados em pesquisas de qualidade do ar, e também, servem de complemento valioso para fontes já existentes.

O DMRB contém um método para somar as emissões de poluentes em estradas, o método trabalha com médias de emissão de cinco tipos de poluentes: monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) e gás carbônico CO₂, para veículos motorizados em função da velocidade do veículo. As medidas de emissão, estão baseadas em uma composição de frota de veículos analisados por ano, até 2020, também, é assumido taxas de emissão para várias classes de veículos nos grupos seguintes:

- Carros a gasolina sem catalisador (pre-1992)
- Carros a gasolina com catalisador (1993-1996), (1997- 2000), (2000)
- Carros a Diesel (pre-1992), (1993-1996), (1997-2000), (2000)
- Veículos Industriais (pequenos, médios e pesados).

Os dados são apresentados em tabelas e o usuário deve calcular as emissões para cada grupo de veículos, para cada local e obter avaliações em médias de emissão.

HB-EFA foi compilado em nome da Agência Ambiental Federal Alemã e do Ministério Federal para o Ambiente-silvicultura e Agricultura, os fatores de emissão são obtidos através de testes de uma amostra representativa de veículos leves e pesados. A quantidade de dados disponíveis de poluentes é mais amplo comparado com os dados DMRB, inclui metano, benzeno, dióxido de enxofre e chumbo, como também os poluentes padrões. Também estão disponíveis dados para outros tipos de veículos como: motocicletas e ônibus. O banco de dados está disponível numa versão alemã e francesa, também está sendo considerada uma versão inglesa. O usuário pode escolher o cálculo de dados de emissão para um determinado tipo de veículo.

MODEM é baseado num projeto de pesquisa desenvolvido por quatro sócios europeus. Os dados são derivados de testes de laboratório que formam a base de um modelo de emissão. Os testes de emissão de poluentes eram levados a cabo usando uma amostra representativa de 150 carros de tipos diferentes. Os poluentes são informados por fatores de emissão como uma função da velocidade e aceleração/desaceleração. Os dados estão disponíveis para monóxido de carbono, de nitrogênio e hidrocarbonetos (junto com gás carbônico e consumo de combustível), para um determinado tipo de veículo, para o qual os registros de velocidade são conhecidas segundo por segundo.

A comparação feita por MICHAEL, BULL e ZIMMANN (1997) entre as três fontes de informação de emissão em relação ao CO, HC, NOx e a velocidade para carros de gasolina. Os dados informaram que para o monóxido de carbono e os hidrocarbonetos, as três fontes são

semelhantes para altas velocidades tanto em seus valores absolutos como em suas tendências. Porém, existem diferenças significativas para o óxido de nitrogênio (ver figura 2.10), onde podemos observar que o MODEM e HB-EFA apresentam emissões mínimas a baixas velocidades, enquanto que os dados do DMRB apresentam altas emissões a baixas velocidades. As tendências também mostram diferenças. Além disso, pode ser observado que para veículos pesados (ver figura 2.11), existem diferenças nos valores absolutos a baixas velocidades para os três poluentes CO, HC e NO_x nas fontes DMRB e HB-EFA, porém as tendências são semelhantes.

Como pode-se observar, diferenças importantes existem entre as fontes analisadas por Michael, Bull e Zimmann (1997). Portanto, deve-se ter cuidado quando se faz uso de dados que pertencem a outras fontes, e não à própria pesquisa, ou seja, deve-se conhecer as características como esses dados foram coletados. Determinar os possíveis fatores que podem haver influenciado na coleta dos mesmos, em cada fonte. Antes da utilização dos dados devem ser feitos relatórios da situação de como foram recolhidas as informações (ambiente, horários, clima, características do tráfego, das vias etc.), para poder fazer as análises necessárias, que permitam caracterizar os dados e evitar que informações sejam utilizadas inadequadamente.

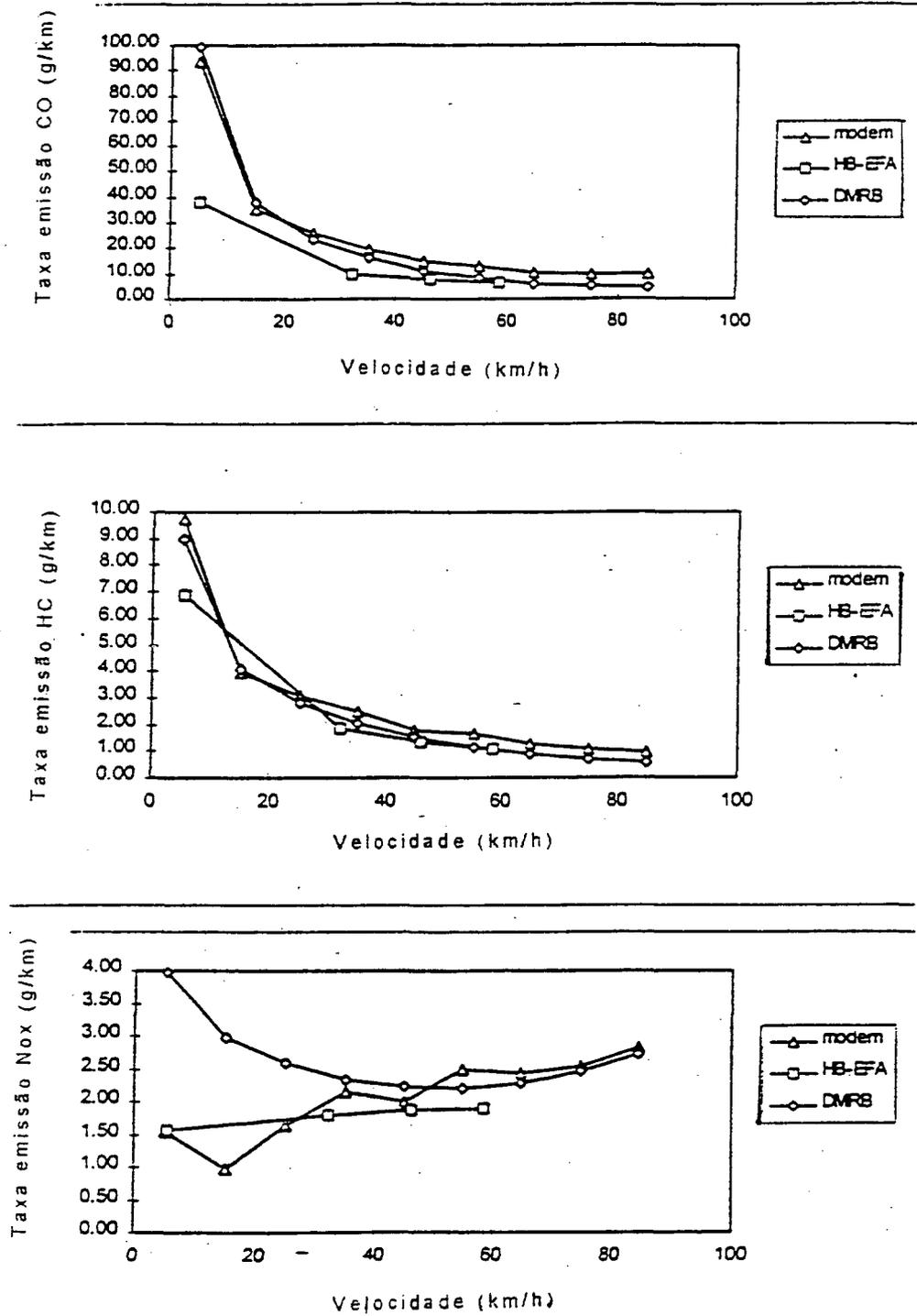


Figura 2.10: Relação entre taxas de emissão e velocidade para veículos a gasolina.

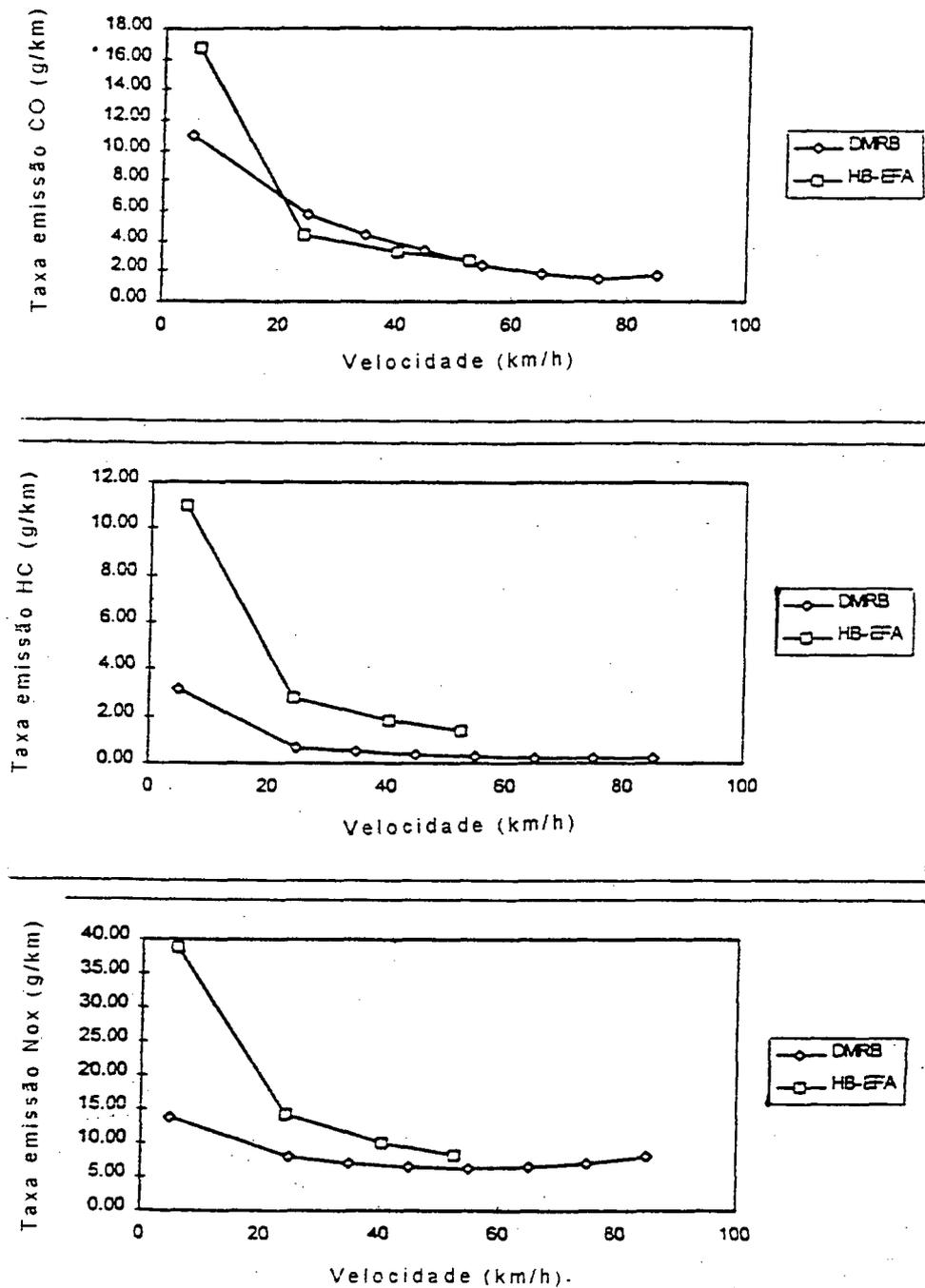


Figura 2.11: Relação entre taxas de emissão e velocidade para veículos pesados.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PROPOSTA

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma abordagem geral dos elementos que compõem o método proposto. O objetivo da presente metodologia é calcular um plano semaforico a tempo fixo e modo isolado, cujo tempo de ciclo seja ótimo, tendo como critério de otimização o atraso e a poluição mínima. Trata-se da descrição dos procedimentos básicos adotados, incluindo o uso de técnicas existentes, bem como outras que foram criadas, como é o caso da inclusão da variável poluição, na otimização de planos semaforicos, dando originalidade ao método apresentado.

No capítulo anterior, foram descritos conceitos importantes que serão utilizados no presente método, também foram apresentados algumas pesquisas cuja preocupação está relacionada com a poluição produzida pelo tráfego urbano, sendo algumas relacionadas diretamente com as interseções sinalizadas por semaforos. Os pesquisadores mencionados anteriormente, em suas trabalhos, mostram a importância dos fluxos veiculares que cruzam interseções sinalizadas, na produção de poluentes. Mas o avanço do presente trabalho é um passo a mais, já que além de mostrar a importância das interseções sinalizadas na produção de poluentes na região,

apresenta-se uma metodologia que permite dimensionar semáforos, isto é, determinar as porções de verde e vermelho de cada fase, cujo dimensionamento permite quantificar a concentração de CO que o semáforo é capaz de produzir, através de uma relação atraso e poluição e que seu funcionamento seja ótimo.

O método adotado neste trabalho, foi desenvolvido considerando os seguintes passos:

- seleção da interseção a ser analisada,
- levantamento de campo,
- análise dos dados utilizados na pesquisa,
- cálculo dos atrasos veiculares,
- relação entre atraso e poluição,
- otimizar o semáforo da interseção selecionada.

3.1. SELEÇÃO DA INTERSEÇÃO A SER ANALISADA

Determinação da localização da interseção a ser analisada e identificação das vias que formam o cruzamento. Mas antes serão dados alguns critérios e parâmetros necessários na escolha da interseção.

3.1.1.-Critérios Considerados para a Escolha da Interseção

- A interseção deve ser sinalizada por um semáforo.
- Para avaliar o impacto do monóxido de carbono sobre as pessoas, como consequência do tráfego na interseção

sinalizada, esta não pode estar afastada de residências, centros de trabalho, centros comerciais e congestionamentos contínuos, onde as pessoas ficam expostas por mais de 8 horas ao poluente.

- A interseção selecionada deve ser uma em que se verifique concentrações significativas de CO.

3.1.2 – Parâmetros Adotadas

Esta pesquisa pretende medir: o volume de fluxos veiculares, os atrasos produzidos pelos veículos motorizados que passam pela interseção sinalizada, os níveis de monóxido de carbono gerados pelo tráfego e os tempos do semáforo da interseção analisada. Para tanto, adotará os seguintes parâmetros representativos para esta análise:

3.1.2.1 - Parâmetros de Tráfego

Volume de Tráfego – representado pelo número de veículos motorizados, que circulam durante os períodos de pico na interseção selecionada.

3.1.2.2 - Parâmetros de Poluição Atmosférica

Poluição atmosférica – representada através da concentração de monóxido de carbono (CO) medidos em ppm. A escolha da concentração de monóxido de carbono para representar a poluição atmosférica, deve-se à importância que este tipo de poluente tem para a qualidade do ar urbano e, também, as características inerentes a este poluente conforme será mostrado a seguir (Carneiro, 1998 e Freitas, 1991):

- é emitido por todos os combustíveis veiculares;
- sua emissão apresenta forte correlação com os modos de operação do tráfego (aceleração, desaceleração, velocidade constante);
- sua concentração pode ser medida de forma contínua, assim possibilita testes para situações onde ocorrerão flutuações de tráfego, e das condições meteorológicas em período de tempo curto;
- é um poluente quimicamente inerte, portanto, sua concentração não é alterada por reações químicas;
- em áreas urbanas, sua principal fonte de emissão é de origem veicular, podendo ser usado como um indicador dos níveis de poluição atmosférica causada por outros tipos de poluentes (ex: hidrocarbonetos e chumbo).

3.1.2.3 - Parâmetros de Sinalização

Os parâmetros de sinalização giram em torno do semáforo veicular, o qual está composto geralmente por três focos de luz de seção redonda: um de cor vermelha, outro de cor amarela e o terceiro de cor verde; e cada uma destas cores tem um tempo de duração medido em segundos.

Tempo de ciclo: é o tempo total, em segundos, para a completa seqüência de sinalização numa interseção.

Estágio ou Intervalo: é um dos vários períodos de tempo dentro do ciclo. Durante esse período as indicações luminosas do

cruzamento, como um todo, não mudam de aspecto, e uma ou mais correntes de tráfego e/ou pedestres têm direito de passagem.

3.1.2.4 - Parâmetros de Atrasos Veiculares

Atrasos veiculares – são os atrasos produzidos pelos veículos motorizados que chegam ao cruzamento selecionado e semaforizado, medidos em segundos.

3.1.2.5 - Parâmetros Geométricos da Via

Serão coletadas as seguintes características geométricas da via: largura da via, distância da linha de parada, da fachada e do meio-fio ao ponto de medição, com dimensões em metros.

3.2.-.LEVANTAMENTO DE CAMPO

O trabalho de campo será desenvolvido considerando os seguintes passos:

3.2.1.-Determinar as Características da Interseção onde serão Coletados os Dados

Tais como :

- número de faixas,
- número de aproximações,
- número de movimentos por aproximação,

- determinar os movimentos conflitantes, divergentes e convergentes. Os movimentos conflitantes, devem ser separados, em estágios distintos.

3.2.2 – Determinar as Características do Semáforo em Operação:

Tais como :

- duração do tempo de ciclo;
- duração dos tempos de verde, vermelho e amarelo;
- número de estágios;
- número de movimentos por estágio;
- Número de grupos focais;
- Número de fases.

3.2.3 Levantamento dos Dados

Serão consideradas duas formas para obter dados: dados colhidos durante a pesquisa e dados pertencentes a outra fonte, ou épocas anteriores.

3.2.3.1 - Dados Colhidos Durante a Pesquisa

As variáveis que serão coletadas na pesquisa são:

Fluxos veiculares- A interseção será observada isoladamente, condição da metodologia do presente trabalho. Isto é, o controle dos movimentos do tráfego será baseado nas condições existentes no cruzamento analisado, sendo que não se levará em conta eventuais interferências exercidas pelos cruzamentos adjacentes. As

observações serão feitas, em períodos de pico e dias típicos da semana. Os horários de pico devem ser selecionados, dependendo das características do tráfego na área. Exemplo: pode-se observar, horários de pico de um dia (manhã, tarde e noite); ou um determinado horário durante os cinco dias úteis da semana ou, também, usando cinco semanas mas no mesmo dia no mesmo horário. Mas é importante destacar que de preferência os horários de pico devem estar próximos para ter uma média de fluxos veiculares representativa, já que os fluxos veiculares variam dia-a-dia, semana-a-semana (Ribeiro 1991).

A contagem dos veículos será feita em intervalos de 10 minutos, até completar uma hora de contagem. A soma dos 6 sub-períodos de 10 minutos, dá como resultado o fluxo médio por hora para cada aproximação.

Concentração de CO - Observar a concentração de CO, no mesmo dia da semana, horários de pico em que foram observados os fluxos veiculares e cada observação deve ser feita em intervalos de 10 minutos. Antes de tudo deve ser determinado a posição do receptor, de preferência antes da linha de parada (Matzoros, 1992). A distância entre o sinal e o receptor depende do critério do pesquisador, quem deve considerar o fluxo veicular. Para fluxos baixos o receptor deve estar de preferência perto ao semáforo.

3.2.3.2 - Dados Pertencentes a outra Fonte, ou Épocas Anteriores

Muitas vezes será necessário utilizar dados de fontes que não pertencem a própria pesquisa, sobretudo, quando há escassez de recursos. Os dados de outras fontes que serão utilizados estão relacionados com fluxos veiculares e concentração de monóxido de

carbono. Esses tipos de dados, antes de serem utilizados, devem ser analisados cuidadosamente para verificar sobre as diferenças em relação aos dados coletados na presente pesquisa, já que os fluxos veiculares e as concentrações de CO são variáveis e sensíveis a mudanças do meio ambiente. Para fazer estas comparações serão feitos testes estatísticos.

3.3- ANÁLISE DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Esta análise tornou-se uma necessidade, já que ajudará a tomar decisões adequadas sobre a utilização dos dados.

A análise será feita para comparar fluxos veiculares e concentrações de monóxido de carbono (CO), coletados em momentos diferentes, para determinar se houve mudanças, de um período para outro, nos padrões de tráfego e nas quantidades de monóxido de carbono emitidas durante um intervalo de tempo determinado.

Para realizar esta análise podem ser utilizadas as seguintes técnicas estatísticas:

- Teste de aderência.
- Teste de diferença entre médias.
- Análise de variância (ANOVA).

No presente trabalho a análise dos dados estará voltada à análise dos fluxos veiculares, cujo procedimento é válido para comparar concentrações de (CO), isto é, depende das informações disponíveis.

3.3.1- Teste de Aderência

O teste de aderência que será utilizado é o teste de Kolmogorov-Smirnov (Lilliefords, H. W., 1967), que independe do tamanho da amostra. O teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) é aplicado com a intenção de determinar se os fluxos veiculares, que serão utilizados na análise, são consistentes com uma distribuição normal. Tendo certeza da normalidade da distribuição dos fluxos veiculares, pode-se fazer os testes subsequentes.

3.3.2.-.Teste de Diferença de Médias

3.3.2.1 - Teste para Amostras Independentes

Quando se dispõe de dados de fluxos veiculares de fontes que não especificam as condições em que foram colhidos. Isto é, não se conhece os antecedentes dos fluxos que serão utilizados na análise.

Com este teste pretende-se comparar os fluxos veiculares obtidos durante a pesquisa, com os fluxos de outras épocas, isto é, conta-se com duas amostras pertencentes a populações diferentes. Para fazer esta análise será utilizado o teste chamado estatística t, para um determinado nível de significância, que pode ser de 1% a 5%, de aceitar se existe diferença entre as duas amostra (Calzada, 1970).

3.3.2.2 - Teste de Diferença de Médias com Dados Pareados

Esta é uma das formas de pesquisa mais simples, e consiste, em formar pares de unidades experimentais, que seriam pares de fluxos

veiculares, onde cada elemento pertence a épocas diferentes ou fontes diferentes, mas colhidos em condições similares. Isto é, fluxos colhidos no mesmo horário de pico, durante um mesmo intervalo de tempo, no mesmo dia da semana- até o mesmo mês. Logo, calcula-se as diferenças dos valores dos pares, tendo como consequência uma amostra de diferença de pares, que seria considerada extraída de uma população de diferença de pares, cuja distribuição é normal.

O procedimento da análise estatística inicia-se considerando a comparação de fluxos veiculares, colhidos em duas épocas diferentes, sob as mesmas condições. Neste caso vai ser medido o efeito tempo. Previamente os fluxos veiculares são identificados por período de análise, por horário de coleta, dia da semana e mês, o que permite formar pares com fluxos similares.

Para aumentar a precisão do experimento, é necessário comparar pares de dados que sejam colhidos em condições o mais similares possíveis (Calzada, 1970).

3.3.3 – Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância será utilizada para comparar três ou mais amostras de fluxos veiculares, e estudar a influência do momento em que foram colhidos.

A análise de variância produz uma estatística F na qual se compara a variação entre grupos e a variação dentro de grupos. (Levin, 1978).

Uma vez feitas as análises estatísticas necessárias dos fluxos veiculares está-se em condições de continuar os passos seguintes do método.

3.4 – CÁLCULO DOS ATRASOS VEICULARES

Para calcular o atraso será utilizado o método de Webster (1958) ou também poderia ser usado o método de Allsop (1981). Podem ser utilizados ainda outros métodos de cálculo do atraso que o pesquisador considerar convenientes, mas estes métodos devem ser para interseções semaforizadas, cujo controle seja a tempo fixo, modo isolado, condição da presente metodologia.

3.4.1 - Método de Webster (1958)

Webster definiu o atraso total de uma aproximação através de uma expressão composta de três parcelas: atraso uniforme, atraso aleatório e termo de correção, cuja formulação é:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda v)} + \frac{v^2}{2q(1-v)} - 0.65(C/q^2)^{1/3} v^{(2+5\lambda)} \quad (3.1)$$

Onde:

d: atraso médio por veículo numa aproximação (Seg.),

C: tempo de ciclo (Seg.),

λ : relação entre tempo de verde efetivo e tempo de ciclo,
 v : grau de saturação, que é a relação entre a demanda e a capacidade da aproximação,
 q : demanda (v_{eq} / Seg.)

Os dois primeiros termos da equação (3.1) referem-se ao atraso uniforme e atraso aleatório, respectivamente. O terceiro termo é um fator de correção, e corresponde a 5-10% do valor do atraso total, o que permite fazer a seguinte aproximação:

$$d = 0,9 \left\{ \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda v)} + \frac{v^2}{2q(1-v)} \right\} \quad (3.2)$$

Como podemos observar o tempo de ciclo tem grande influência sobre o atraso.

3.4.2 - Método de Allsop (1981)

Allsop em 1981 elaborou um programa computacional denominado SIGSET, cujo objetivo é calcular o tempo de ciclo ótimo e os tempos de verde efetivo para cada fase, minimizando o atraso produzido pelo tráfego que passa pela interseção controlada com semáforos operando com a estratégia de tempo fixo. O SIGSET, foi elaborado com base da teoria. Allsop (1971a e 1971b).

Este programa é baseado na fórmula de atraso simplificada de Webster (3.2). O atraso total da interseção é expresso por Allsop

como uma combinação linear da fórmula de atraso de Webster, através da seguinte expressão:

$$D = \sum_{j=1}^n q_j d_j \quad (3.3)$$

Onde:

D: atraso total da interseção (Seg.),

q_j : fluxo veicular para a aproximação j ($V_{eq.}/\text{Seg.}$),

d_j : atraso da aproximação j calculado pela fórmula de Webster (Seg.),

n é o número de aproximações ($n \leq 20$).

O SIGSET estima valores médios menores para o atraso na interseção em relação aos estimados por Webster. Esta diferença é maior para tempos de ciclo curtos. Portanto, este método pode ter vantagens em interseções, onde os tempos de ciclo podem ser reduzidos dando uma apreciável redução do atraso.

Este método tanto pode ser usado para casos em que o tempo de ciclo é especificado e deseja-se saber os tempos de verde adequados para cada fase, como para casos em que se necessite calcular o tempo de ciclo.

Para o cálculo do plano semaforico utilizando o programa SIGSET são necessários os seguintes dados de entrada: fluxos veiculares médios por aproximação, fluxo de saturação para cada aproximação, tempo perdido em cada estágio, tempo verde mínimo para cada estágio, e tempo de ciclo máximo.

3.5 – RELAÇÃO ENTRE ATRASO E POLUIÇÃO

A relação atraso e poluição será calculada para cada ponto de observação. Como estamos analisando um cruzamento, recomenda-se calcular uma relação para cada aproximação, já que o comportamento dos fluxos em cada aproximação é diferente, o que faz com que os atrasos produzidos por eles também sejam diferentes. Neste estudo, será utilizada a Análise de Regressão.

A análise de Regressão se inicia com a construção de um diagrama de dispersão, através do qual temos um indicador inicial da relação atraso e poluição. As possíveis relações podem ser lineares ou não lineares. Ser linear ou não linear depende das características da interseção, e do tipo e ano dos veículos que passam pelo cruzamento.

Ressaltamos que na aplicação do presente método deve ser levado em conta uma restrição importante, qual seja, a relação atraso poluição, esta deve ser crescente. A relação a ser utilizada é:

$$p = f(d) \quad (3.4)$$

Onde:

p: poluição medida em concentrações de CO (ppm),

d: atraso veicular (Seg.).

3.5.1 - Relacionamento Linear Entre as Variáveis

Havendo indicações de um relacionamento linear entre o atraso (d) e poluição (p) o modelo de regressão linear a ser utilizado é:

$$p = \beta_0 + \beta_1 d + \varepsilon \quad (3.5)$$

Onde:

ε : erro aleatório,

β_0 e β_1 : constantes desconhecidas.

Como os β_0 e β_1 são desconhecidos, será necessários estimá-los por meio do emprego de dados amostrais da forma, (d_i, p_i) , $i = 1, 2, \dots, n$, são os n pares de dados observados.

É importante destacar que existem algumas suposições associadas ao modelo de regressão linear simples que devem ser cumpridas para garantir sua validade. São elas:

- os erros têm média zero e a mesma variância desconhecida σ^2 ;
- os erros são não correlacionados;
- a variável explicativa é controlada pelo experimentador e é medida com erro desprezível, ou seja, não é uma variável aleatória;
- os erros têm distribuição normal.

Para ajustar o modelo de regressão linear será utilizado o método de Mínimos Quadrados, ver Kmenta (1990). Tendo como resultado a reta ajustada:

$$\hat{p} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 d_0 \quad (3.6)$$

Onde:

$\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$: estimadores de β_0 e β_1 respectivamente,

\hat{p} : valor estimado da poluição para um valor dado do atraso (d_0).

Maiores informações sobre análise de regressão são encontradas em: Chatterjee e Price (1977) e Kmenta (1990).

3.5.2 - Estudo da Adequação do Modelo de Regressão Linear

Para que o modelo de regressão ajustado possa ser empregado como base para outros estudos, é necessário que as suposições feitas durante a sua construção sejam válidas, as quais devem ser verificadas utilizando alguns métodos, como:

3.5.2.1 - Análise de Resíduos

Um resíduo é definido por: $e_i = (p_i - \hat{p}_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$

Onde:

p_i é uma observação e \hat{p}_i é o valor correspondente estimado por meio do modelo de regressão. Os resíduos e_i deverão refletir as propriedades dos erros ε_i no modelo (3.5).

A análise da adequação do modelo utilizando os resíduos será feita pelos gráficos de resíduos. A análise do gráfico de resíduos, dará indicações, se existe alguma inadequação no modelo, tais como:

- falta de linearidade da equação de regressão,
- violação da condição de que os erros tenham variância constante,

- violação da condição da não correlação, dos resíduos,
- violação da condição da normalidade dos resíduos,
- presença de observações extremas.

3.5.2.2 - Teste de Durbin-Watson (Dw)

Este teste também pode ser utilizado para verificar a existência de autocorrelação nos resíduos da regressão, baseado no valor

$$Dw = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (3.7)$$

Onde os e_i representam os resíduos dos mínimos quadrados ordinários.

Informações sobre este teste são encontradas em: Judge, Hill, Griffiths, Lutkepohl e Chao Lee (1988).

3.5.2.3 - Teste de Normalidade, Usando o Coeficiente de Correlação Entre os Resíduos (r)

Este teste também pode ser usado para determinar se a suposição de normalidade dos resíduos foi violada. Informações sobre este teste podem ser encontradas em: Aguiar, Drumond e Werkema (1996).

Maiores informações sobre adequação do modelo de regressão temos em Chatterjee e Price (1977).

3.5.3 - Relação não Linear entre as Variáveis

Se a relação entre atraso e poluição não é linear, há duas possibilidades: tentar ajustar diretamente os dados a uma relação não linear adequada, ou buscar uma transformação inicial adequada da relação em uma forma aproximadamente linear, o que permite aplicar as técnicas desenvolvidas para a regressão linear. Ajustar diretamente os dados a uma relação não linear é muito complicado, pois, quando aplicados os mínimos quadrados, as equações normais de estimação são extremamente difíceis de serem resolvidas, inclusive para casos de equações não lineares simples. Portanto, recomenda-se fazer transformações para uma forma linear.

Como foi determinado anteriormente, a fim de que se aplique o presente método, a relação atraso e poluição deve ser crescente, o que também é válido para casos não lineares. Portanto, para determinar se a curva $p = f(d)$ é crescente, o coeficiente angular deve ser positivo, isto é, a primeira derivada de $p = f(d)$ em relação a d , nos pontos do intervalo considerado, deve ser positiva. O atraso e a poluição tomam valores maiores ou iguais a zero.

A preocupação agora é transformar um modelo não linear crescente em uma forma linear para se poder aplicar as técnicas da regressão simples. Os modelos não lineares que podem ser transformados em formas lineares são conhecidos como intrinsecamente lineares. Os modelos intrinsecamente lineares são aqueles que podem ser expressados numa forma linear, por meio de transformações adequadas em ambas variáveis dependente e

independente (Draper e Smith, 1966). Como exemplo de funções intrinsecamente lineares e crescentes, tem-se:

$$a) y = \beta_0 x^{\beta_1}$$

$$b) y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$$

$$c) y = \beta_0 + \beta_1 \log x$$

Estas funções são intrinsecamente lineares já que podem ser transformadas em uma linha reta por meio de uma transformação logarítmica, ver caso (a).

$y = \beta_0 x^{\beta_1}$, aplicando uma transformação logarítmica temos:

$$\ln y = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln x$$

$$\ln y = y^1$$

$$\ln \beta_0 = \beta_0^1$$

$$\ln x = x^1$$

$$y^1 = \beta_0^1 + \beta_1 x^1$$

Ou seja, está-se frente a um modelo de regressão linear. Maiores informações sobre transformações de modelos não lineares poderão ser encontradas em Box e Cox (1964), Box e Tidwell (1962) e Montgomery (1992).

Uma vez feita a transformação de uma relação não linear em uma linear, é estudada a adequação do modelo para verificar se as suposições da regressão linear não foram violadas, utilizando-se os métodos já mencionados no item 3.5.2.

Tendo sido o modelo que relaciona atraso e poluição ajustado adequadamente, já tem-se a relação que será utilizada para determinar a poluição produzida por um determinado plano semaforico.

3.6 - OTIMIZAR O SEMÁFORO DA INTERSEÇÃO SELECIONADA

Para otimizar o semáforo da interseção selecionada, em princípio serão fornecidas algumas condições importantes, em seguida será desenvolvido o dimensionamento do semáforo e, finalmente, serão calculados o atraso e a previsão da poluição produzidos pelo semáforo dimensionado.

3.6.1 – Condições Necessárias para Otimizar o Semáforo

Para otimizar o semáforo da interseção selecionada são consideradas três condições importantes, a primeira delas foi verificada por Webster (1958). A segunda e a terceira são propostas pelo presente trabalho, sendo a segunda condição relacionada com a restrição imposta pelo presente método e a terceira condição corresponde à inclusão da variável poluição na otimização do semáforo, cumprindo com um dos objetivos do presente trabalho e dando originalidade à metodologia apresentada. As condições a serem dadas são as seguintes:

Primeira Condição - Em relação ao tempo de ciclo e o atraso – Webster (1958) verifica que quanto maior é o tempo de ciclo, maior é o tempo de vermelho e, conseqüentemente, maior é o atraso uniforme. Diminuindo-se o tempo de vermelho, através da redução do ciclo, o atraso torna-se proporcional, tendência que permanece até um certo valor do ciclo. Para ciclos inferiores a este valor, o tempo necessário para o veículo se deslocar passa a ser significativo diante do tempo de verde, o que implica em um aumento acentuado do atraso. Isto permitiu a Webster deduzir a existência de um ciclo ótimo para um atraso mínimo. A figura 3.1 mostra o efeito da variação do tempo de

ciclo (C) e do atraso (d), o que permite identificar o ciclo ótimo. Portanto, para que a seja o tempo de ciclo ótimo para um atraso mínimo, segundo Webster, cumpre-se:

$$\frac{\partial d(a)}{\partial C} = 0$$

$$\frac{\partial^2 d(a)}{\partial C^2} > 0$$

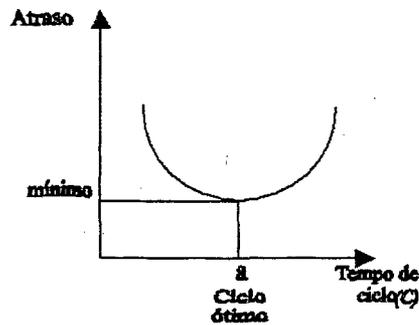


Figura 3.1: Ciclo ótimo para atraso mínimo

Segunda Condição - A relação poluição atraso é crescente, restrição do presente método. Se a relação poluição atraso é crescente, o coeficiente angular tem que ser positivo, isto é, a primeira derivada de $p = f(d)$ com respeito a d tem que ser positiva no respectivo intervalo considerado, isto é:

$$\frac{\partial p}{\partial d} > 0$$

Terceira Condição - Como a relação atraso e poluição é crescente, o ponto mínimo do atraso com relação ao tempo de ciclo deve coincidir com o ponto mínimo da poluição em relação ao tempo de ciclo. A figura 3.2 mostraria este efeito da variação do ciclo (C) em relação à poluição (p), permitindo identificar o ciclo ótimo. O problema torna-se então em:

Otimizar (mínimo): $p=f(C)$

Sendo $f(C)>0$, $C>0$ e $f(C)$ uma função não linear da variável C a procura do ótimo (mínimo)

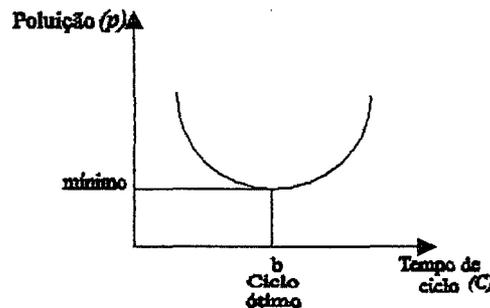


Figura 3.2: Ciclo ótimo para poluição mínima

Portanto, para ter b como tempo de ciclo ótimo para uma poluição mínima, isto é, $a=b$, deve-se mostrar que também se cumpre :

$$a) \frac{\partial p(b)}{\partial C} = 0$$

$$b) \frac{\partial^2 p(b)}{\partial C^2} > 0$$

- O caso (a) pode ser demonstrado considerando que se:

$$\frac{\partial p}{\partial C} = \frac{\partial p}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial C}$$

onde a $\frac{\partial d}{\partial C} = 0$ (condição de ponto ótimo local em a)

então:

$$\frac{\partial p(b)}{\partial C} = 0, \text{ demonstrada a condição de ponto ótimo em b}$$

- Demonstração do caso (b), considerando que, se:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial C^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial C \partial d} \frac{\partial d}{\partial C} + \frac{\partial p}{\partial d} \frac{\partial^2 d}{\partial C^2}$$

o termo $\frac{\partial d}{\partial C} = 0$ (condição de ótimo em a)

os termos $\frac{\partial p}{\partial d}$ e $\frac{\partial^2 d}{\partial C^2}$ são maiores que zero, por ser função crescente e pela condição de mínimo entre atraso e tempo de ciclo, respectivamente.

Então:

$$\frac{\partial^2 p(b)}{\partial C^2} > 0, \text{ demonstrada a condição de mínimo em b}$$

Fica demonstrado que o atraso mínimo corresponde a uma poluição mínima em relação ao tempo de ciclo, isto é, $a=b$, quando existe uma relação crescente entre atraso e poluição.

3.6.2 - Dimensionar o Semáforo da Interseção Seleccionada

Tendo certeza de que as condições anteriores se cumprem para a poluição em relação ao ciclo, pode-se dimensionar o plano

semafórico de modo que o tempo de ciclo seja ótimo para a interseção selecionada. O plano dimensionado será a tempo fixo modo isolado. O dimensionamento consiste nas seguintes etapas:

3.6.2.1 - Calcular o fluxo de saturação das aproximações- Para estimar o fluxo de saturação serão utilizadas as larguras de cada aproximação segundo a seguinte expressão:

$$S = 525L \quad (3.8)$$

Onde:

S: fluxo de saturação ($v_{eq.}/htv$),

L: largura da aproximação (m).

A qual pode ser corrigida quando estamos frente a casos de declividade, localização, perda de largura por estacionamento, conversões etc. (Denatran, 1979).

3.6.2.2 - Efetuar a contagem de veículos para determinar a demanda horária nas aproximações do cruzamento. Estas contagens devem se feitas nos horários de pico, em intervalos de 10 minutos até completar uma hora de contagem. A soma dos 6 sub-períodos de 10 minutos, dá como resultado o fluxo médio por hora para cada aproximação.

3.6.2.3 - Determinar o número de estágios do cruzamento, utilizando diagrama de estágios que é uma representação esquemática da seqüência dos movimentos permitidos e proibidos para cada intervalo do tempo do ciclo, ver Denatran (1979).

3.6.2.4 - Determinar o número de fases do cruzamento, utilizando o diagrama de tempos o qual associa os instantes de mudança dos estágios com a seqüência de cores e duração das fases, ver Denatran (1979).

3.6.2.5 - Calcular as taxas de ocupação y_i , para cada aproximação e escolher para cada fase aquela de maior valor, que será denominada taxa de ocupação crítica da fase (y_i^*). A taxa de ocupação (y) de uma aproximação é definida como sendo a relação entre a demanda de tráfego e o fluxo de saturação, ou seja:

$$y_i = \frac{q_i}{S_i} \quad (3.9)$$

Onde:

y_i : taxa de ocupação da aproximação i ;

q_i : demanda (fluxo horário) da aproximação i (v_{eq}/h);

S_i : fluxo de saturação da aproximação i (v_{eq}/htv).

3.6.2.6 - Calcular Y , correspondente à somatória das taxas de ocupação críticas das fases do cruzamento;

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i^* \quad (3.10)$$

onde:

n é número de fases, do cruzamento.

3.6.2.7 - Calcular o tempo total perdido (T_p) durante um ciclo, segundo a expressão:

$$T_p = \sum_{i=1}^n I_i + \sum_{i=1}^n (I - t_{ai}) \quad (3.11)$$

Onde:

- T_p é tempo perdido (Tempo morto) total do cruzamento, por ciclo em segundos;
- I é o período de entreverdes, em segundos, definido como o tempo entre o fim do período verde de uma fase que está perdendo o direito de passagem e o início de outra que o está ganhando; o número de períodos entre verdes é igual ao número de fases da interseção;
- I_i é o tempo perdido da fase i , em segundos;
- t_{ai} é o tempo de amarelo da fase i .

Para os casos mais comuns, onde não existe vermelho geral e o período entreverdes coincide com o amarelo, o tempo total perdido é simplesmente a soma dos tempos perdidos em cada fase do cruzamento. Um valor aproximado para o tempo perdido total do cruzamento por ciclo pode ser adotado como numericamente igual à soma dos tempos de amarelo das fases envolvidas. Isto não é aconselhável para interseções nas quais ocorram situações anômalas, como por exemplo, alta percentagem de caminhões, geometria complexa, grandes distâncias a vencer etc. (CET-SP, 1978).

3.6.2.8 - Cálculo do tempo de ciclo ótimo e os tempos de verde de cada fase - Para calcular o tempo de ciclo ótimo vai ser possível

utilizar o método de Webster e Cobbe (1966) ou o método de Allsop (1981).

3.6.2.8.1 - Método de Webster e Cobbe (1966)- Desenvolveram uma expressão para o tempo de ciclo em relação ao atraso total do cruzamento. Este tempo é chamado de ciclo ótimo ou seja aquele que causa o mínimo atraso total no cruzamento. Esta expressão é:

$$C_0 = \frac{1,5Tp + 5}{1 - Y} \quad (3.12)$$

Onde:

C_0 , é tempo de ciclo ótimo (Seg);

Tp , é o tempo total perdido no cruzamento durante um ciclo (Seg);

Y , é somatório da taxa de ocupação crítica (y^*) de cada fase do cruzamento ou taxa de ocupação do cruzamento.

Calculado o tempo de ciclo ótimo, torna-se necessário determinar os tempos de verde efetivo de cada fase do cruzamento. Webster concluiu que o atraso causado ao tráfego que utiliza o cruzamento seria mínimo, se o tempo total de verde efetivo do ciclo ótimo fosse distribuído proporcionalmente às taxas de ocupação crítica de cada fase. Assim, o tempo efetivo verde da fase i , é dado pela expressão:

$$g_{.efi} = \frac{y_i^*}{Y} (C_0 - Tp) \quad (3.13)$$

Onde:

g_{efi} é o tempo de verde efetivo da fase i (Seg);

Y_i é a taxa de ocupação crítica da fase i;

Y é a somatória das taxas de ocupação crítica das fases do cruzamento;

C_0 tempo de ciclo ótimo (Seg);

T_p é o tempo total perdido no ciclo (Seg).

E finalmente será determinado os tempos de verde para implantação no controle de tráfego (tempo verde real). Conhecendo os tempos de verde efetivo de cada fase, determina-se os tempos reais de verde, cujos valores serão implantados no controlador de tráfego do cruzamento. Utilizando-se a fórmula:

$$g_i = g_{efi} + I_i - t_{ai} \quad (3.14)$$

Onde:

g_i é duração do período de verde (verde real) da fase i (Seg);

g_{efi} é tempo de verde efetivo da fase i (Seg);

I_i é o tempo perdido na fase i (Seg);

t_{ai} é o tempo de amarelo da fase i (Seg).

Nos casos em que o tempo perdido (tempo morto) é numericamente igual ao tempo de amarelo o verde real será igual ao efetivo.

3.6.2.8.2 - Método de Allsop (1981).- Outra maneira de calcular o ciclo ótimo será utilizando, o Programa Computacional SIGSET desenvolvido por Allsop, ver item 3.4.2.

3 6.3 - Cálculo do Atraso Produzido pelo Plano Ótimo Calculado

O atraso produzido pelo plano ótimo será calculado também utilizando o método de Webster (1958) ou o método de Allsop (1981) descritos no item 3.4.

3.6.4 -Previsão da Poluição

Para o atraso mínimo calculado d temos o grau de poluição mínima produzida \hat{p} pelo plano semaforico dimensionado no item 3.6.2, cujo ciclo é ótimo. A poluição \hat{p} é obtida através da relação de predição (3.4). Como consequência deste modelo, para o caso linear, temos que, substituindo o atraso (d) da expressão (3.6) pela fórmula 3.2 do atraso (Webster, 1958) do item 3.4.1, a poluição fica em função do tempo de ciclo (C), como é mostrado a seguir:

$$\hat{p} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \left[0,9 \left\{ \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda v)} + \frac{v^2}{2q(1-v)} \right\} \right] \quad (3.15)$$

Também temos uma relação importante para o tempo de ciclo (C) em função da poluição estimada, quando usada a fórmula de atraso de Webster, para o caso linear, dada a seguir:

$$C = \frac{2g_{ef} + 2M \pm \sqrt{(4g_{ef}^2 + 4M^2 + 8Mg_{ef}) - 4(g_{ef}^2 + 2Mg_{ef}v)}}{2} \quad (3.16)$$

em que: g_{ef} : tempo de verde efetivo [Seg.];

M: foi utilizado para abreviar os cálculos, cuja expressão é:

$$M = \frac{10\hat{p}}{9\hat{\beta}_1} - \frac{v^2}{2q(1-v)} \quad (3.17)$$

Para o caso não linear, as relações $p=f(C)$ e $C=f^{-1}(p)$, dependem do tipo de relação não linear crescente a que foram ajustados os dados. Sendo que estas relações podem ser conseguidas com mais facilidade usando a forma transformada, já que se está trabalhando com um modelo linear.

A poluição mínima produzida pelo semáforo cujo ciclo é ótimo quando seu atraso é mínimo, deve estar dentro dos limites dos padrões de qualidade do ar permitido. Neste caso, a programação do semáforo será considerada como programação ótima.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo tem por finalidade ilustrar a utilização do método desenvolvido, bem como demonstrar sua aplicabilidade. A aplicação é desenvolvida tendo em conta os passos mencionados na metodologia apresentada no capítulo anterior.

4.1 – ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DA INTERSEÇÃO

A pesquisa é desenvolvida na cidade de Florianópolis, sendo considerada como interseção selecionada, aquela formada pela Rua Heitor Luz e pela Av. Mauro Ramos. Esta Interseção fica localizada no centro da cidade, próxima ao shopping Beira Mar.

Levando em conta os critérios estabelecidos na metodologia proposta, temos os seguintes critérios em relação a interseção selecionada:

- A interseção da Rua Heitor Luz e Av. Mauro Ramos, é semaforizada, está próxima de residências, centros de trabalho, centros comerciais e as pessoas ficam expostas por mais de 8 horas ao poluente. Nesta interseção ocorrem grandes congestionamentos,

sobretudo nos horários de pico, comprometendo, muitas vezes o trânsito do bairro Trindade, de onde sai um fluxo significativo de veículos e pedestres, provenientes da Universidade Federal de Santa Catarina.

- Nesta interseção foram registradas as mais altas concentrações de CO. Os maiores picos da concentração média de 10 minutos ocorreram nos períodos de 13:00/13:10 h (10,7 ppm) e 13:50/14:00 h (9,1 ppm). A maior concentração média de uma hora foi de 7,2 ppm, ocorrida entre 13 h e 14 h. (Carneiro, 1998).

A interseção selecionada tem as seguintes características: é um cruzamento de duas vias, sendo uma de mão única e a outra de mão dupla. Tem três aproximações, cada uma delas associada a um movimento de aproximação e uma linha de parada, sendo que:

- da aproximação 1, originam-se os movimentos 1, 2 e 3;
- da aproximação 2, originam-se os movimentos 4 e 5 e
- da aproximação 3, origina-se um único movimento, o movimento 6.

Os movimentos observados têm as seguintes características: os conflitantes são (1) - (5), (1) - (6) e (2) - (6); e os convergentes são (1)- (4), (2) - (5) e (3) - (6). Esta interseção é apresentada esquematicamente na figura 4.1.

O semáforo em operação apresenta as seguintes características:

- Número de estágios - O semáforo em operação está composto por três estágios, esquematicamente apresentado na figura 4.2.
- Número de movimentos por estágio e grupo focal:
 - estágio I, têm direito de passagem os movimentos 1,2 e 3, e pertencem ao grupo focal G(1);

- estágio II, têm direito de passagem os movimentos 4 e 5, e pertencem ao grupo focal G(2);
- estágio III, têm direito de passagem os movimentos 4, 5 e 6, e o movimento 6 pertence ao grupo focal G(3).

A figura 4.3, resume esta distribuição.

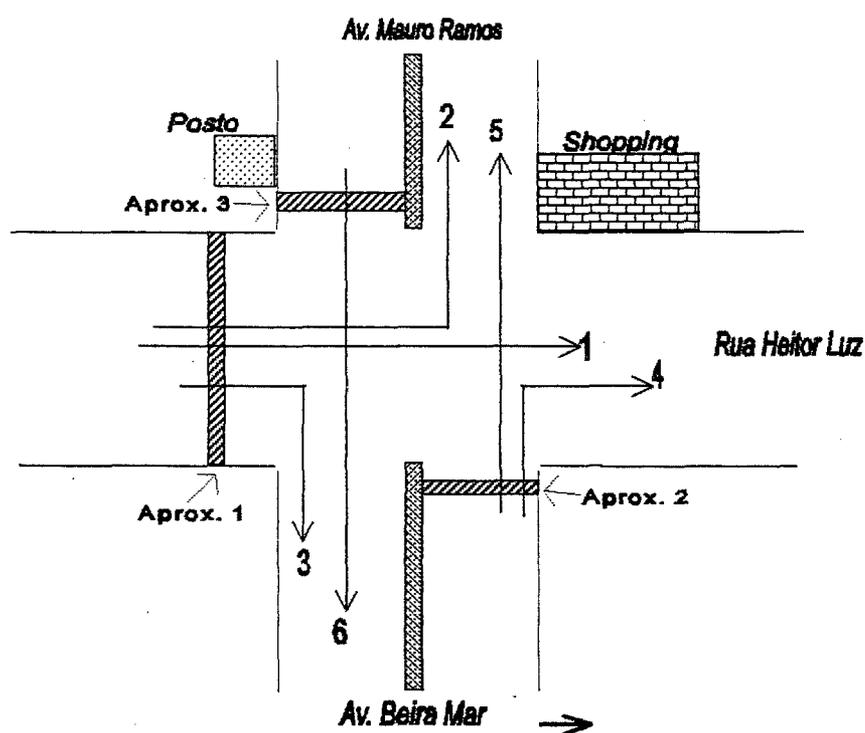


Figura 4.1: Representação Esquemática da Interseção Selecionada

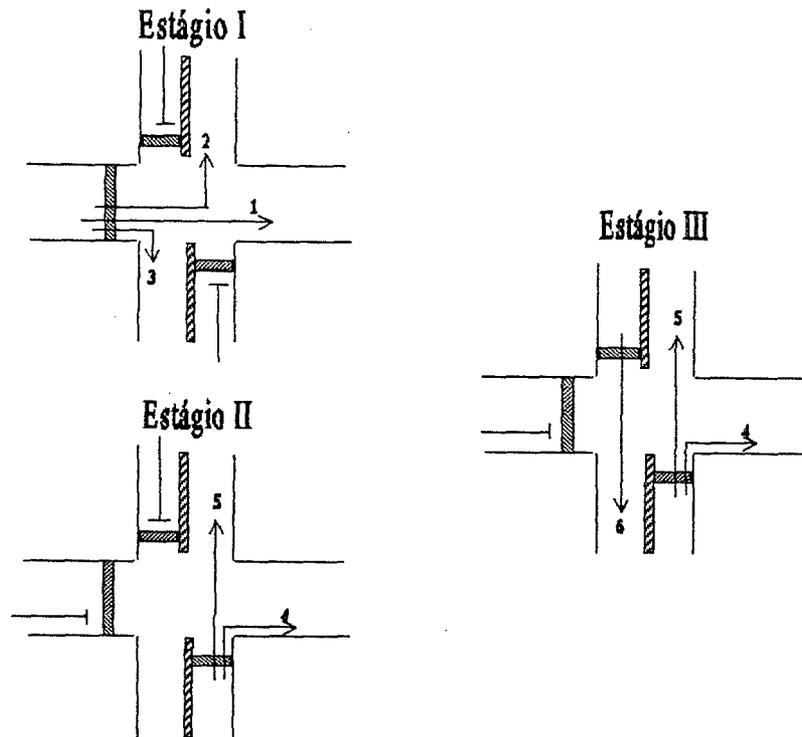


Figura 4.2: Representação Esquemática dos Estágios do Semáforo em Operação

Movimen- -tos	Estágios			Grupo Focal
	1	2	3	
1	Sim			Grupo focal G(1)
2	Sim			
3	Sim			
4		Sim	Sim	Grupo focal G(2)
5		Sim	Sim	
6			Sim	Grupo focal G(3)

Figura 4.3: Número de Movimentos por Estágio e Grupo Focal

- Diagrama de tempos- Na figura 4.4, é visualizado o faseamento do semáforo por estágio.

As variáveis que foram coletadas no trabalho de Carneiro (1998), e utilizadas na presente pesquisa, foram informações pertencentes ao cruzamento da Rua Heitor Luz com a Av. Mauro Ramos e são as seguintes:

Fluxo de veículos motorizados– foram levantados através de contagem manual durante o período 7:30 às 21:10, sendo 10 minutos em cada hora fora de pico, e 60 minutos de horário de pico. Considera-se horários de pico de tráfego: de 7:30 às 8:30 h, de 11:30 às 12:30 h, de 13:30 às 14:30 h, e 17:30 às 18:30 h (estes horários de pico foram usados na presente pesquisa). O ponto de observação localiza-se a esquerda da rua Heitor Luz, no sentido: bairro-centro, antes do semáforo, ponto que corresponde a aproximação 1, do cruzamento, segundo o esquema da figura 4.1. Neste ponto, a rua é de mão única, e dá acesso, principalmente, ao shopping Beira Mar e a Av. Mauro Ramos via expressa norte. É uma via arterial, com congestionamento periódico. Os picos máximos ocorrem nos períodos de 13:30/13:40 h, 13:50/14:00 h e 18:20/18:30 h. cujo fluxo médio é de 164 veículos cada 10 minutos.

Concentração de monóxido de carbono (CO) – foi medida continuamente na mesma aproximação onde foram medidos os fluxos veiculares, no período de, 7:30 às 21:10, com médias a cada 10 minutos. As concentrações de monóxido de carbono que serão utilizadas no presente trabalho são as medidas em horários de pico (7:30 às 8:30 h, de 11:30 às 12:30 h, de 13:30 às 14:30 h, e 17:30 às 18:30 h), nos mesmos horários em que foram medidos os fluxos veiculares.

Para medir o monóxido de carbono, Carneiro (1998), utilizou o medidor de monóxido de carbono StreetBox, desenvolvido pelo pesquisador Ben Croxford da Universidade de Londres.

Os dados colhidos por Carneiro (1998) que foram utilizados na presente pesquisa, são apresentados no quadro A-1 em anexo.

4.2.2 - Dados Colhidos Durante a Pesquisa

A variável coletada na presente pesquisa foi o volume de tráfego. As coletas dos fluxos veiculares na presente pesquisa foram feitas nas mesmas condições (horários, semana e mês), que a pesquisa feita por Carneiro (1998). A interseção foi observada isoladamente, condição da metodologia do presente trabalho. O controle dos movimentos do tráfego, baseia-se nas condições existentes no cruzamento analisado, sendo que não se leva em conta eventuais interferências exercidas pelos cruzamentos adjacentes. As observações foram feitas durante uma semana, em períodos de pico (11:30-12:30; 13:30-14:30; 17:30-18:30) e todas as medições foram feitas manualmente.

Para realizar a contagem dos fluxos foi necessário o trabalho de três pesquisadores, identificados como pesquisador 1, 2 e 3; o posicionamento na interseção pode ser verificado na figura 4.5.

A contagem dos veículos foi feita em intervalos de 10 minutos, até completar uma hora de contagem. A soma dos 6 sub-períodos de 10 minutos, dá como resultado o fluxo médio por hora para cada aproximação.

Os dados colhidos durante a pesquisa, são apresentados no quadro A-2 em anexo.

Este levantamento dos fluxos veiculares, feitos durante a presente pesquisa, foi necessário para verificar se existem mudanças

significativas nos padrões de tráfego em relação à pesquisa feita por Carneiro (1998). Se não houver diferenças significativas, pode-se utilizar ambas informações no desenvolvimento da presente pesquisa, em especial, na elaboração do plano semafórico, o qual será otimizado com fluxos da presente pesquisa. A avaliação dos fluxos será feita utilizando alguns testes estatísticos já mencionados na metodologia.

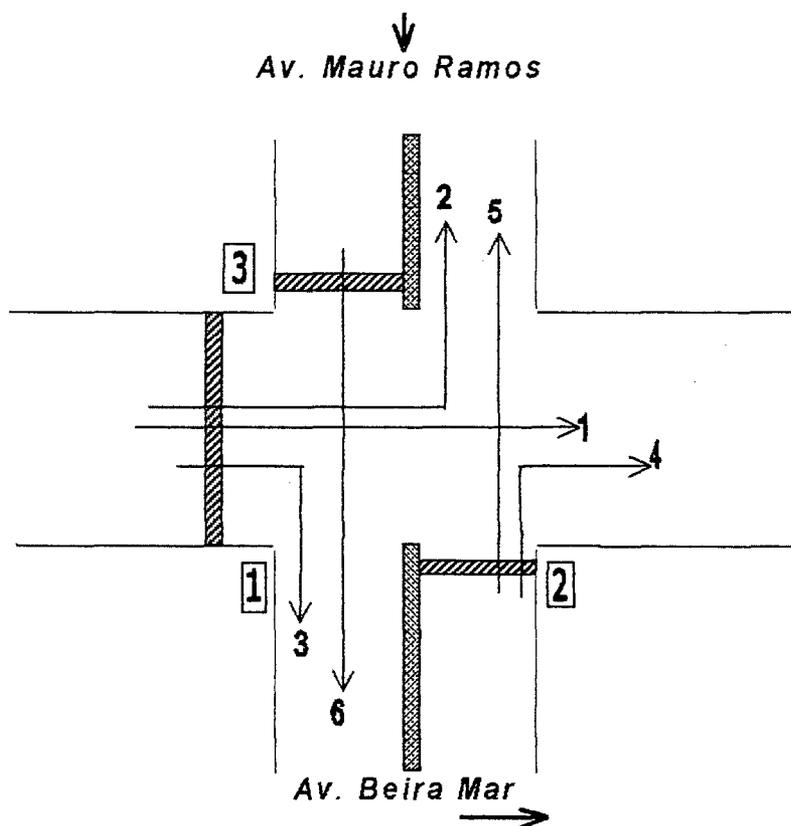


Figura 4.5: Posicionamento dos Pesquisadores que Fazem a Contagem.

4.2.3 – Comparação e Avaliação dos Dados por Análise Estatística

A análise estatística é utilizada para comparar os fluxos veiculares dos anos 1998 e 1999, ano em que foi feito o levantamento dos dados para o presente trabalho. Os dados apresentados no quadro

4.1 relativos ao ano 1998, foram obtidos da pesquisa realizada por Carneiro.

Os testes que foram utilizados no presente estudo de caso são :

- Teste de Aderência
- Teste de diferença de médias com dados pareados.

4.2.3.1 - Teste de Aderência

Com o objetivo de avaliar se os fluxos veiculares tanto de 1998 como de 1999 seguem uma distribuição normal, foi utilizado o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S). Os resultados obtidos são:

Para os fluxos 1998 o $K_s = 0,1058795$,

Para os fluxos 1999 o $K_s = 0,0773595$.

Segundo a tabela do teste K-S, para $n=18$ e $\alpha = 1\%$; 5% ; 10% os $K_{s\alpha}$ são: $0,239$; $0,200$; $0,184$ respectivamente. Como todos estes valores excedem os valores K_s calculados para ambos os grupos de fluxos, conclui-se que a distribuição dos fluxos de 1998 e 1999 seguem uma distribuição normal.

4.2.3.2 - Teste de Diferença de Médias Com Dados Pareados

Este teste é utilizado no presente trabalho pela característica das informações, já que a análise estatística inicia-se considerando a comparação de fluxos veiculares colhidos em duas épocas diferentes (1998 e 1999) e nas mesmas condições. Neste caso, vai ser medido o efeito tempo. Previamente, os fluxos veiculares são identificados por período de análise, por horário de coleta, dia, número de semana e mês, o que permite formar pares com fluxos similares.

Quadro 4.1 - Fluxos Veiculares Observados na Rua
Heitor Luz, nos anos de 1998 e 1999.

HORÁRIOS	1998		1999	
	veq/10mi	veq/h.	veq/10mi	veq/h
11:30/11:40	125	750	126	756
11:40/11:50	137	822	138	828
11:50/12:00	121	726	124	744
12:00/12:10	103	618	105	630
12:10/12:20	140	840	144	864
12:20/12:30	107	642	110	660
13:30/13:40	159	954	145	870
13:40/13:50	136	816	155	930
13:50/14:00	165	990	168	1008
14:00/14:10	153	918	155	930
14:10/14:20	146	876	150	900
14:20/14:30	114	684	117	702
17:30/17:40	128	768	131	786
17:40/17:50	136	816	138	828
17:50/18:00	129	774	130	780
18:00/18:10	111	666	113	678
18:10/18:20	134	804	135	810
18:20/18:30	169	1014	171	1026

Hipótese a testar:

$$H_0 : U_{98} - U_{99} = 0$$

$$H_a : U_{98} - U_{99} \neq 0$$

Onde:

U_{98} é a média dos fluxos veiculares de 1998

U_{99} é a média dos fluxos veiculares de 1999

Utilizando a distribuição t, temos:

$$t \text{ calculado} = 1,7248$$

Comparando com o $t_{\alpha} = 1,740$, obtido da tabela de distribuição t de Student, com 17 graus de liberdade e $\alpha = 5\%$ de significância, concluimos que o t calculado é menor que o t tabular. Portanto, aceitamos a hipótese nula, que não existe diferença significativa entre os fluxos veiculares contados em 1998 e aqueles contados em 1999, para 5% de significância e 17 graus de liberdade.

Feitos estes dois testes, temos a certeza de que não houve mudança estatisticamente significativa dos fluxos veiculares entre os dois períodos considerados. Portanto, algumas informações obtidas em 1998, relacionadas com os fluxos, podem ser utilizadas no presente trabalho.

4.3 - CÁLCULO DOS ATRASOS VEICULARES E SUAS RELAÇÕES COM A POLUIÇÃO NA INTERSEÇÃO EM ESTUDO

4.3.1 – Cálculo dos Atrasos Veiculares na Interseção em Estudo

Para calcular os atrasos veiculares foram utilizados os dois métodos mencionados na metodologia: método de Webster (1958) e o método de Allsop (1981) (ver item 3.2.4).

4.3.1.1 – Atrasos Calculados pelo Método de Webster (1958)

Segundo o método de Webster (1958), os dados de entrada são:

- Fluxos observados nos horários de pico (Carneiro, 1998). Estes dados encontra-se no quadro 4.1.
- Tempo de ciclo (C): 120 Seg.
- Porção de verde efetivo: 0,23.
- Grau de saturação (v) (ver quadro 4.2).

Quadro 4.2 - Grau de Saturação

FLUXO Veq./h	GRAU DE SATURAÇÃO.(V)	FLUXOS Veq/h	GRAU DE SATURAÇÃO.(V)
750	0,681	918	0,834
822	0,747	876	0,796
726	0,659	684	0,621
618	0,561	768	0,698
840	0,763	816	0,741
642	0,583	774	0,703
954	0,866	666	0,605
816	0,741	804	0,730
990	0,899	1014	0,921

Os resultados obtidos com a aplicação do método de Webster (1958) são apresentados no quadro 4.3:

Quadro 4.3 – Atrasos da Aproximação 1 da Interseção
(Calculados Segundo Webster, 1958).

HORÁRIOS	FLUXOS (veq/h)	FLUXOS (veq/seg)	ATRASSO (seg.)
11:30/11:40	750	0,208	40,910
11:40/11:50	822	0,228	42,799
11:50/12:00	726	0,202	40,378
12:00/12:10	618	0,172	38,427
12:10/12:20	840	0,233	43,378
12:20/12:30	642	0,178	38,824
13:30/13:40	954	0,265	49,353
13:40/13:50	816	0,227	42,605
13:50/14:00	990	0,275	53,311
14:00/14:10	918	0,255	46,808
14:10/14:20	876	0,243	44,734
14:20/14:30	684	0,190	39,558
17:30/17:40	768	0,213	41,332
17:40/17:50	816	0,227	42,605
17:50/18:00	774	0,215	41,473
18:00/18:10	666	0,185	39,233
18:10/18:20	804	0,223	42,270
18:20/18:30	1014	0,282	57,576
Média	804	0,223	43,643
Sd.	115,5	0,0321	5,115

Os atrasos calculados no quadro 4.3 correspondem à aproximação 1 do cruzamento segundo o esquema da figura 4.1. Estes atrasos são informações que serão usados na relação atraso e poluição. Os fluxos veq./seg. apresentados no quadro 4.3, não têm interpretação prática, são dados que a fórmula de atraso 3.2 de Webster exige.

4.3.1.2 – Atrasos Calculados pelo Método de Allsop (1981)

Para calcular os atrasos, segundo este método, foi utilizado o programa computacional SIGSET elaborado por Allsop (1981) (ver item 3.2.4).

Os dados de entrada são:

- Fluxos veiculares observados por Carneiro (1998) (ver quadro 4.1)
- Fluxos de saturação para cada aproximação:
 $S_1 = 4721 v_{eq}/htv$
 $S_2 = 3150 v_{eq}/htv$
 $S_3 = 3676 v_{eq}/htv$
- Tempo perdido na mudança da fase: 3,3 Seg.
- Tempo de verde mínimo: 10 Seg.
- Tempo de ciclo máximo: 120 Seg.

Os atrasos calculados são apresentados no quadro 4.4. Estes atrasos, também são dados que serão usados na relação atraso e poluição.

Quadro 4.4 – Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Allsop, 1981)

HORÁRIO	FLUXOS veq/h	ATRASSO (seg.)
11:30/11:40	750	40,84
11:40/11:50	822	39,49
11:50/12:00	726	39,31
12:00/12:10	618	34,75
12:10/12:20	840	40,84
12:20/12:30	642	38,01
13:30/13:40	954	43,91
13:40/13:50	816	39,31
13:50/14:00	990	45,31
14:00/14:10	918	42,56
14:10/14:20	876	41,17
14:20/14:30	684	38,19
17:30/17:40	768	38,01
17:40/17:50	816	39,31
17:50/18:00	774	36,04
18:00/18:10	666	35,67
18:10/18:20	804	36,04
18:20/18:30	1014	46,32
Média	804	39,72
Sd.	115,5	3,270

4.3.2 – Cálculo da Relação entre Atraso e Poluição

A princípio, foi feita a relação atraso e poluição, considerando os atrasos calculados, segundo o método de Webster (1958). Em

seguida, a relação atraso e poluição, utilizando os atrasos calculados segundo Allsop (1981). A poluição obtida através da pesquisa de Carneiro (1998) é a nova variável proposta nesta tese. Ambos os cálculos correspondem à aproximação 1 do cruzamento segundo o esquema da figura 4.1. Na análise do tipo de relacionamento entre o atraso e a poluição é usada a análise de Regressão; tal como foi mencionado na metodologia.

4.3.2.1 - Relação Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Foi construído um diagrama de dispersão (ver figura 4.6) para visualizar o tipo de relacionamento existente entre as duas variáveis atraso e poluição, cujos dados encontram-se no quadro 4.5. O gráfico obtido sugere a existência de um relacionamento linear crescente entre atraso(d) e poluição(p).

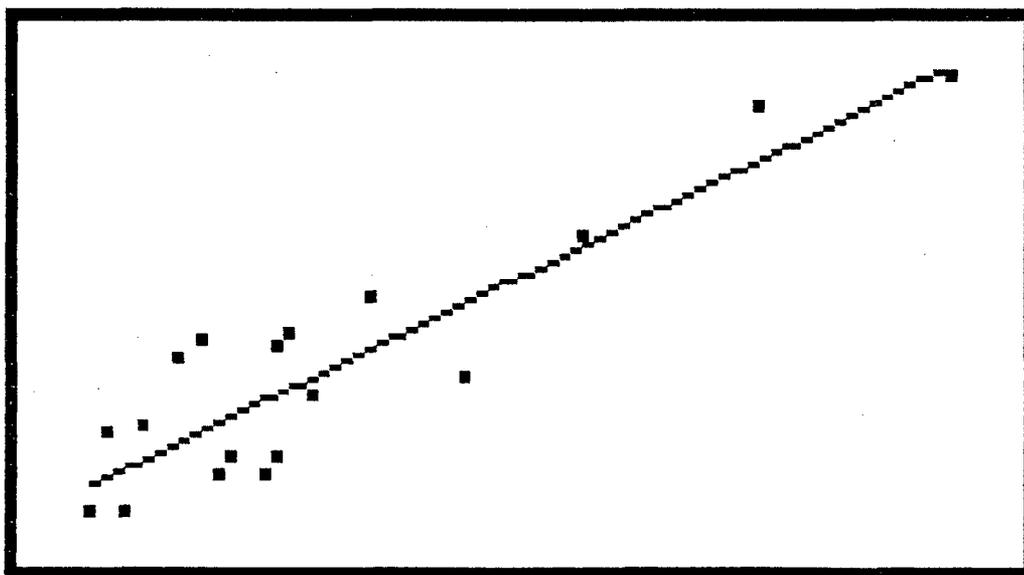


Figura 4.6: Diagrama de Dispersão da Relação Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Quadro 4.5.- Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Webster,1958) e Poluição

HORÁRIOS	ATRASOS (seg.)	POLUIÇÃO (p.p.m.)
11:30/11:40	40,910	4,754
11:40/11:50	42,799	4,862
11:50/12:00	40,378	4,474
12:00/12:10	38,427	1,679
12:10/12:20	43,378	3,720
12:20/12:30	38,824	3,102
13:30/13:40	49,353	6,652
13:40/13:50	42,605	4,628
13:50/14:00	53,311	9,126
14:00/14:10	46,808	4,113
14:10/14:20	44,734	5,587
14:20/14:30	39,558	3,163
17:30/17:40	41,332	2,250
17:40/17:50	42,605	2,629
17:50/18:00	41,473	2,629
18:00/18:10	39,233	1,656
18:10/18:20	42,270	2,335
18:20/18:30	57,576	3,158
Media	43,643	4,276
Sd.	5,115	2,299

4.3.2.1.1 - Ajuste do Modelo de Regressão, entre Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Após a construção do Diagrama de Dispersão, o passo seguinte realizado foi ajustar uma equação que representasse o relacionamento linear entre as duas variáveis consideradas. Este ajuste foi feito por meio da técnica estatística de regressão linear simples, ver capítulo 3, cujo modelo ajustado é:

$$\hat{p} = -13,2232 + 0,4010d$$

Esta equação indica que, em média, para cada aumento de uma unidade do atraso a poluição experimentará um aumento de 0,4010.

Sendo que o coeficiente de correlação R para o modelo é igual a 0,898 e o coeficiente determinação R^2 igual a 0,8071, o qual indica que a reta de regressão da amostra ajusta-se muito bem às observações.

Para avaliar se de fato existe um efeito linear da variável atraso (d) sobre a poluição (p), decidiu-se testar se o coeficiente β_1 da reta de regressão poderia ser igual a zero, isto é:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 > 0$$

Com nível de significação $\alpha = 5\%$.

Análise de variância está sumarizada no quadro 4.6

Quadro 4.6 - Análise de Variância do Modelo Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Fontes de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_0
Regressão	72,50005	1	72,50005	66,954
Residual	17,32544	16	1,08284	
Total	89,82549	17		

Como $F_0 = 66,954 > F_{0,05}(1,16) = 4,49$, portanto, rejeita-se a H_0 , concluindo que $\beta_1 > 0$. Isto significa que foi possível concluir que realmente existe um efeito linear entre atraso(d) e poluição(p).

Com o objetivo de obter faixas dos possíveis valores para os parâmetros do modelo de Regressão linear relacionando o atraso(d) e a poluição (p), foram construídos intervalos de 95% de confiança, que são apresentados a seguir:

- Intervalo de confiança para β_1 :

$$0,29712 \leq \beta_1 \leq 0,50488$$

Este intervalo indicou que, para cada aumento de uma unidade no atraso(d) a poluição(p) poderia aumentar de 0,2971 a 0,5049.

- Intervalo de confiança para β_0 é:

$$-17,7874 \leq \beta_0 \leq -8,6586$$

4.3.2.1.2 – Estudo da Adequação do Modelo de Regressão entre Atraso (Calculado Segundo Webster, 1958) e Poluição

Para que o modelo ajustado neste estudo de caso possa ser empregado como base nas previsões da poluição produzida na aproximação 1, da interseção selecionada como consequência da instalação de um semáforo, é necessário que as suposições feitas em sua construção sejam válidas. Na verificação das suposições serão utilizados os métodos apresentados na metodologia que são os seguintes:

- **Análise de Resíduos**

Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados – O gráfico de resíduos contra valores ajustados é apresentado na Figura 4.7. Este gráfico foi construído a partir dos dados do quadro 4.7.

Segundo o gráfico, da figura 4.7, os resíduos estão situados, aproximadamente, em uma faixa horizontal centrada em $e_i = 0$. Analisando o gráfico não se percebeu qualquer indicação da presença das seguintes inadequações:

- Falta de linearidade da equação de regressão.
- Violação da condição de que os erros tenham variância constante.
- Presença de observações extremas .

Quadro 4.7 - Valores Ajustado da Poluição e Resíduos do Modelo
Atrasos (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Nº DE CASO	VALOR AJUSTADO(\hat{p})	RESÍDUO
1	3,1797	1,5743
2	3,9371	0,9249
3	2,9664	1,5076
4	2,1841	-0,5051
5	4,1692	-0,4493
6	2,3433	0,7587
7	6,5649	0,0871
8	3,8593	0,7687
9	8,1519	0,9741
10	5,5445	-1,4315
11	4,7129	0,8741
12	2,6376	,05254
13	3,3489	-1,0989
14	3,8593	-1,2303
15	3,4054	-0,7764
16	2,5073	-0,8513
17	3,7250	-1,3900
18	9,8620	-0,2620
Mínimo	2,1841	-1,4315
Máximo	9,8620	1,5743
Média	4,2755	0,0000
Mediana	3,7921	-0,0875

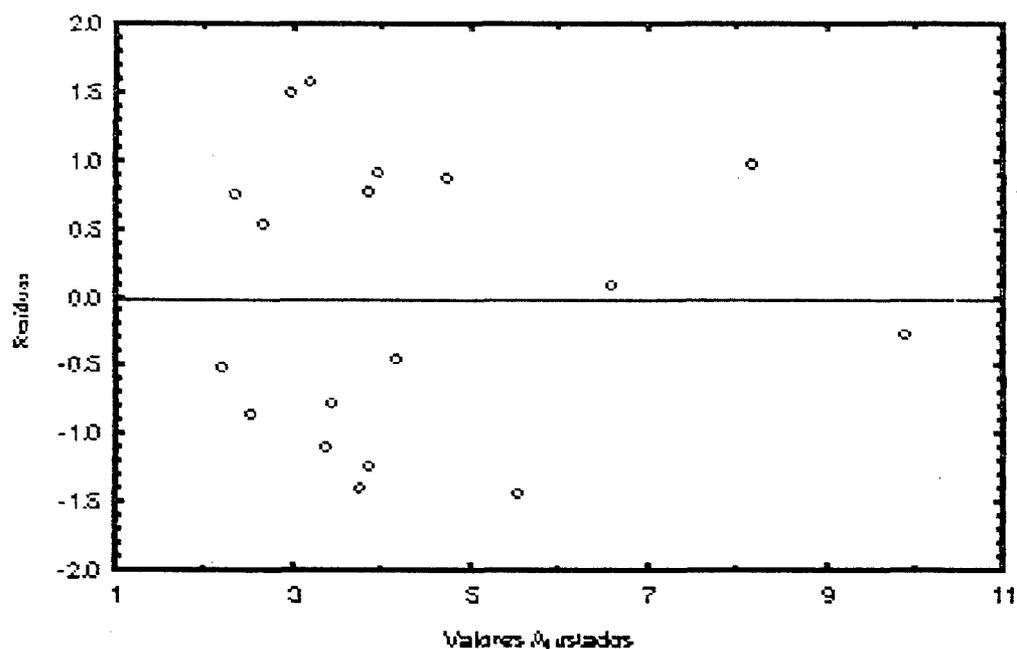


Figura 4.7: Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados do Modelo Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Também utilizando o gráfico de resíduos contra o tempo, não foi notado qualquer configuração especial que indicasse uma associação dos resíduos com a ordem de obtenção dos dados, revelando que a suposição de ausência de correlação entre os erros não parecia ter sido violada. Ver figura 4.8.

Para confirmar a indicação do gráfico de Resíduos contra o tempo foi realizado o teste de Durbin-Watson, como foi definido na metodologia.

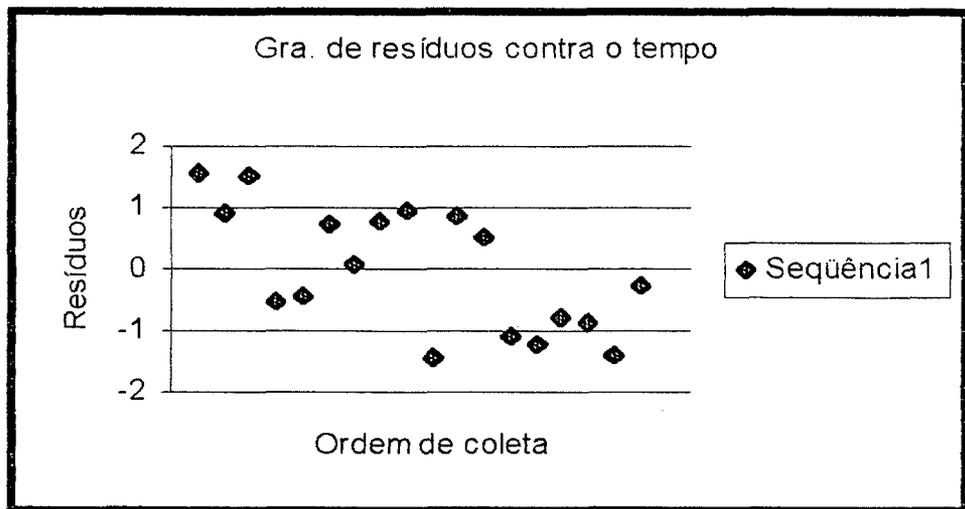


Figura 4.8: Gráfico de Resíduos Contra o Tempo do Modelo Atraso. (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

O teste Durbin-Watson nos permite testar se existe autocorrelação nos resíduos. Portanto, serão testadas as hipóteses:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

No nível de significância 5% , usando o teste de Durbin-Watson, os valores da tabela apropriados de DwL e DwU para 18 observações e uma variável independente são:

$$DwL = 1,16 \quad (4-DwU) = 2,61$$

$$DwU = 1,39 \quad (4-DwL) = 2,84$$

O valor calculado da estatística Dw é:

$$Dw = 1,42$$

Como pode-se observar Dw calculado é maior que DwU e menor que $(4-DwU)$. Portanto, a hipótese de não-auto-regressão ($\rho=0$) tem que ser aceita.

Normalidade dos Resíduos - A validade da suposição de normalidade dos resíduos é verificada utilizando o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, ver figura 4.9. Este gráfico foi construído a partir dos valores dos resíduos apresentados no quadro 4.7. Neste gráfico de normalidade se observa que os pontos estão em torno da reta. Para confirmar esta indicação foi realizado o teste de Normalidade, baseado no coeficiente de correlação linear, cujo resultado é igual a 0,9718. Segundo a tabela do teste de normalidade, para $n=18$ e $\alpha = 1\%$; 5% ; 10% , os valores críticos são: 0,926; 0,951 e 0,960 respectivamente. Como todos estes valores são menores que 0,9718, conclui-se que não foram obtidas indicações de violação da suposições de normalidade.

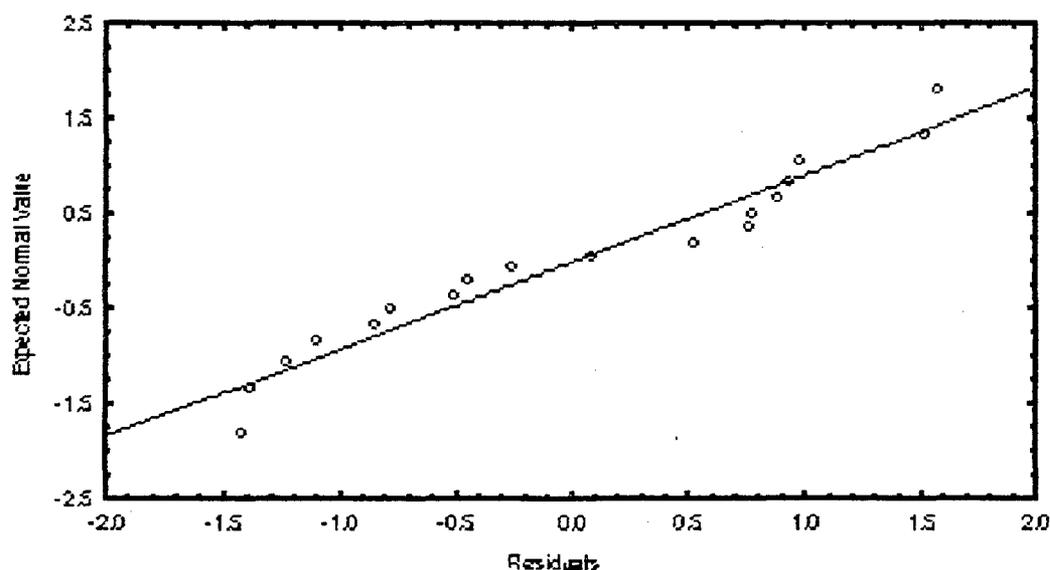


Figura 4.9: Gráfico de Normalidade dos Resíduos do Modelo Atraso (Calculados Segundo Webster, 1958) e Poluição

Com estas análises pode-se concluir que as suposições do modelo de regressão linear não foram violadas.

Portanto, pode-se utilizar como base para este estudo a relação atraso(d), poluição(p) ajustada:

$$\hat{p} = -13,2232 + 0,4010\hat{d}.$$

4.3.2.2 - Relação Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição

O análise desta relação foi feita seguindo os passos do caso anterior, como construção, ajuste e adequação da linha de regressão, portanto, serão apresentados os resultados obtidos.

O diagrama de dispersão também mostra um relacionamento linear entre as variáveis atraso e poluição, como mostra a figura 4.10, cujos dados estão no quadro 4.8.

4.3.2.2.1 - Ajuste do Modelo de Regressão, entre Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Linha ajustada é:

$$\hat{p} = -20,73 + 0,6241d$$

Esta equação indica que, em média, para cada aumento de uma unidade do atraso a poluição aumenta em 0,6241.

Em seguida foi calculado o coeficiente de determinação R^2 cujo, valor é igual a 0,747, o qual indica que a reta de regressão da amostra ajusta-se bem às observações.

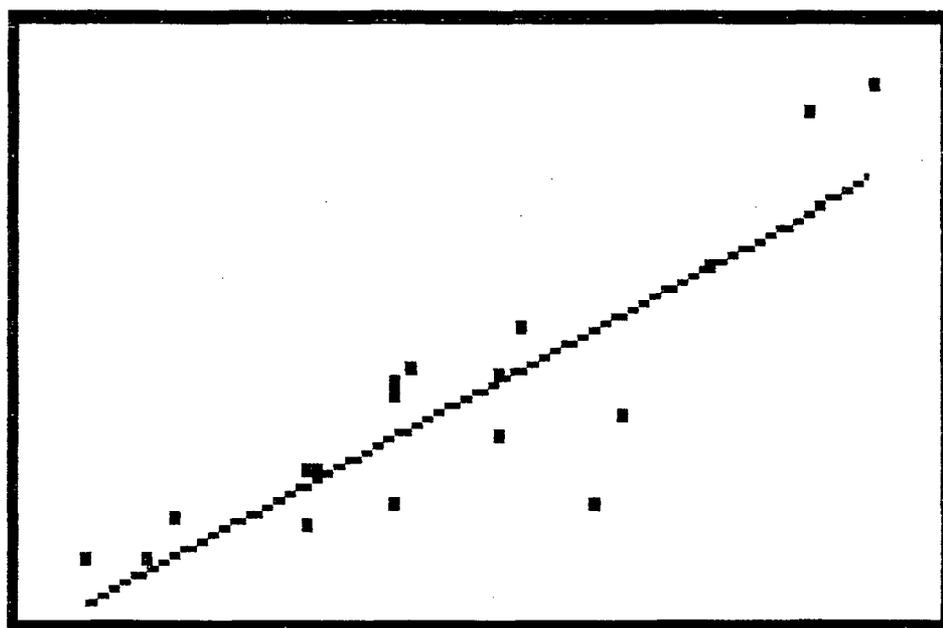


Figura 4.10: Diagrama de Dispersão da Relação Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Quadro 4.8 – Atrasos da Aproximação 1 da Interseção (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição

HORÁRIOS	ATRASOS (seg.)	POLUIÇÃO (p.p.m.)
11:30/11:40	40,84	4,754
11:40/11:50	39,49	4,862
11:50/12:00	39,31	4,474
12:00/12:10	34,75	1,679
12:10/12:20	40,84	3,720
12:20/12:30	38,01	3,102
13:30/13:40	43,91	6,652
13:40/13:50	39,31	4,628
13:50/14:00	45,31	9,126
14:00/14:10	42,56	4,113
14:10/14:20	41,17	5,587
14:20/14:30	38,19	3,163
17:30/17:40	38,01	2,250
17:40/17:50	39,31	2,629
17:50/18:00	36,04	2,629
18:00/18:10	35,67	1,656
18:10/18:20	36,04	2,335
18:20/18:30	46,32	3,158
Media	39,72	4,276
Sd.	3,270	2,299

Para avaliar se de fato existe um efeito linear da variável atraso (d) sobre a poluição (p), igual ao caso anterior decidiu-se testar se o coeficiente β_1 da reta de regressão poderia ser igual a zero, isto é:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 > 0$$

Com nível de significação $\alpha = 5\%$.

Análise de variância está sumarizada no quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Análise de Variância do Modelo, Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Font. De Variação	Soma De Quadrados	Graus De Liberdade	Quadrado Medio	F_0
Regressão	67,15384	1	67,15384	47,39228
Residual	22,67165	16	1,41698	
Total	89,82549	17		

Como $F_0 = 47,39 > F_{0,05}(1,16) = 4,49$, portanto, rejeita-se a H_0 , concluindo que $\beta_1 > 0$. Isto significa que foi possível concluir que realmente existe um efeito linear entre atraso (d) e a poluição (p).

Para obter faixas dos possíveis valores para os parâmetros de Regressão linear relacionando o atraso (d) e a poluição (p), foram construídos intervalos de 95% de confiança, e são os seguintes:

Intervalo de confiança para β_1 :

$$0,4331 \leq \beta_1 \leq 0,817.$$

Este intervalo indicou que, para cada aumento de uma unidade no atraso(d) a poluição(p) poderia aumentar de 0,4331 a 0,817.

Intervalo de confiança para β_0 é:

$$-28,453 \leq \beta_0 \leq -13,007.$$

4.3.2.2.2 - Estudo da Adequação do Modelo de regressão entre Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Na verificação das suposições serão utilizados os seguintes métodos, desenvolvidos no caso anterior:

▪ Análise de Resíduos

Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados – O gráfico de resíduos contra valores ajustados é apresentado na Figura 4.11. Este gráfico foi construído a partir dos dados do quadro 4.10.

Segundo o gráfico os resíduos contra valores ajustados dão a impressão de não linearidade, os pontos distribuem-se de forma convexa para baixo.

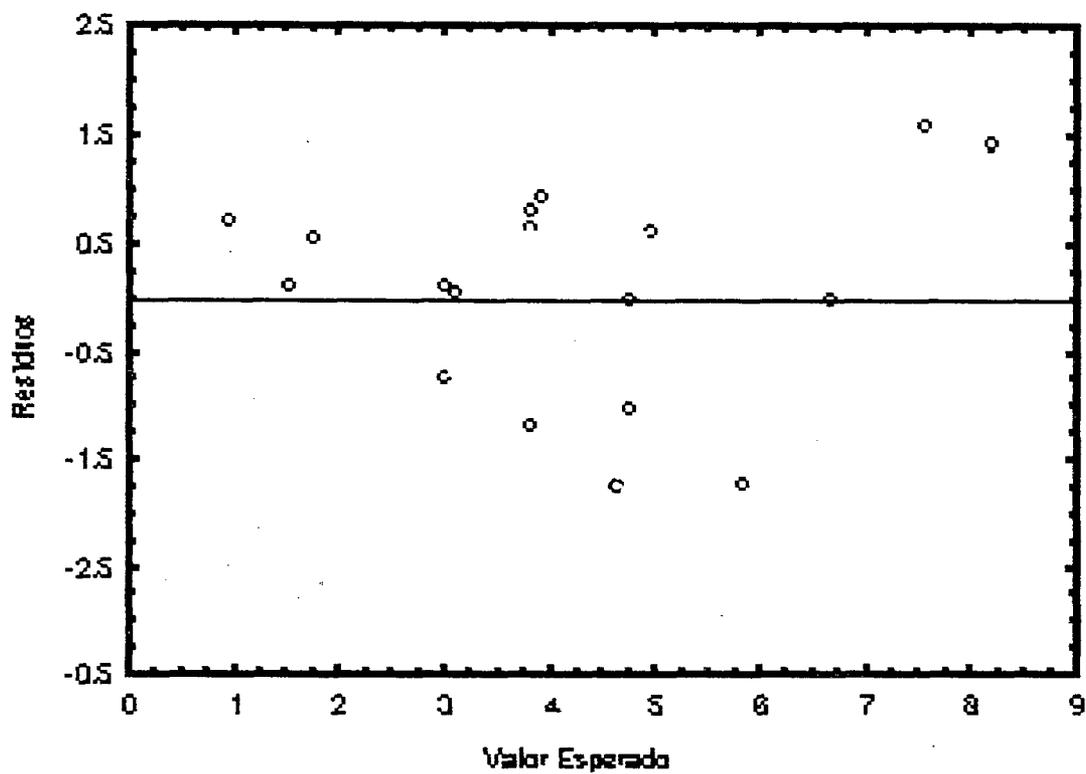


Figura 4.11: Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados do Modelo Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Quadro 4.10 - Valores ajustado da Poluição e Resíduos do Modelo Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Nº DE CASO	VALOR AJUSTADO(\hat{p})	RESÍDUO
1	4,7564	-0,0024
2	3,9139	0,9481
3	3,8016	0,6724
4	0,9559	0,7231
5	4,7564	-1,0364
6	2,9903	0,1117
7	6,6722	-0,0202
8	3,8016	0,8264
9	7,5459	1,5801
10	5,8297	-1,7167
11	4,9623	0,6247
12	3,1026	0,06038
13	2,9903	-0,74029
14	3,8016	-1,1726
15	5,6113	-2,9823
16	1,5300	0,1260
17	1,7609	0,5741
18	8,1762	1,4238
Mínimo	0,9559	-2,9823
Máximo	8,1762	1,5801
Média	4,2755	0,0000
Mediana	3,8577	0,1189

Para estudar se existe auto-regressão nos resíduos também foi usado o teste de Durbin-Watson, cujas hipóteses a testar são:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

No nível de significância 5% , usando o teste de Durbin-Watson, os valores da tabela, apropriados de DwL e DwU para 18 observações e uma variável independente são:

$$DwL = 1,16$$

$$DwU = 1,39$$

$$(4-DwL) = 2,84$$

$$(4-DwU) = 2,61$$

O valor calculado da estatística Dw é:

$$Dw = 1,68$$

Como pode-se observar Dw calculado é maior que DwU e menor que (4-DwU) . Portanto, a hipótese de não-auto-regressão ($\rho = 0$) tem que ser aceita.

Normalidade dos Resíduos - A validade da suposição de normalidade dos resíduos é verificada utilizando o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, ver figura 4.12.

O gráfico de normalidade dos resíduos foi construído a partir dos valores dos resíduos apresentados no quadro 4.10. Neste gráfico de normalidade observa-se que os pontos estão em torno da reta. Para confirmar esta indicação foi realizado o teste de Normalidade, baseado no coeficiente de correlação linear, cujo valor é igual a 0,950. Segundo a tabela do teste de normalidade para $n=18$ e com níveis de significação de 1%; 5%; 10%, os valores críticos são aproximadamente: 0,926; 0,951 e 0,960 respectivamente. Como pode-se observar para o nível 5% e 10% de significância o valor calculado de 0,950, é menor que os valores críticos da tabela de normalidade.

Portanto, a esses níveis de significância registra-se falta de normalidade.

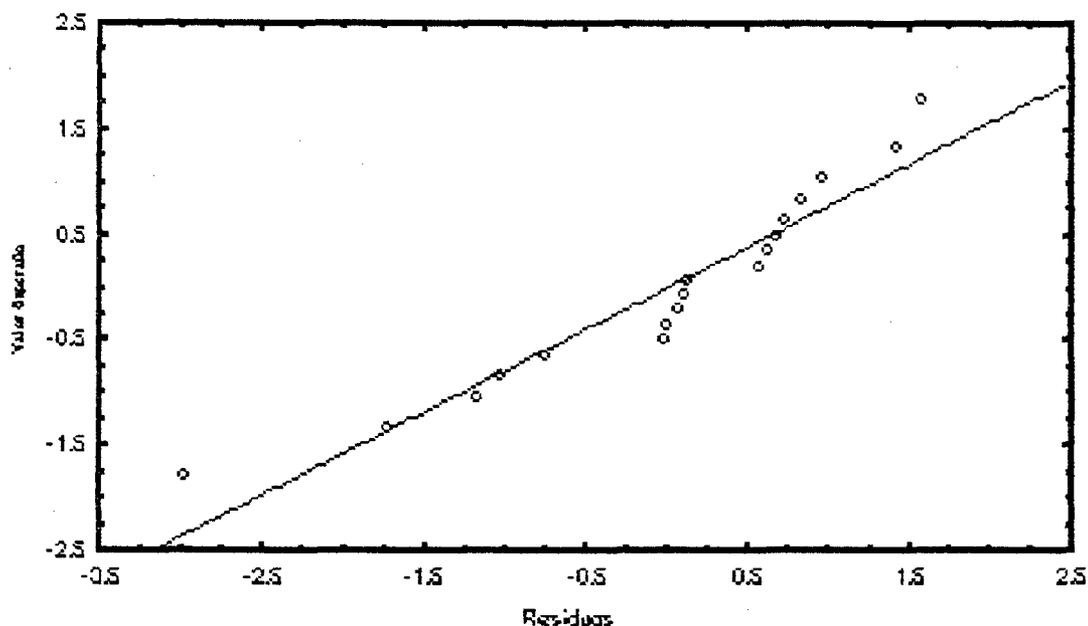


Figura 4.12: Gráfico de Normalidade dos Resíduos do Modelo Atraso (Calculado Segundo Allsop, 1981) e Poluição

Estas inadequações induzem a pensar em uma forma não linear para a relação atraso(d) e poluição (p). Para tanto, será necessário voltar para o Diagrama de Dispersão dos dados (figura 4.10).

4.3.2.3 – Relação Atraso (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Poluição, Corrigida

Observando o Diagrama de Dispersão da figura 4.10, nota-se uma pequena curvatura, a qual nos leva a pensar na forma não linear seguinte:

$$p = \beta_0 e^{\beta_1 d}$$

Esta é uma função intrinsecamente linear e pode ser transformada em uma linha reta usando uma transformação logarítmica da seguinte forma:

$$\ln p = \ln \beta_0 + \beta_1 d$$

$$\text{onde: } p^1 = \ln p; \quad \beta_0^1 = \ln \beta_0; \quad \beta_1^1 = \beta_1; \quad d^1 = d.$$

Portanto, o modelo fica na forma linear seguinte:

$$p^1 = \beta_0^1 + \beta_1^1 d^1$$

Como foi observado anteriormente, as violações das suposições de que os erros têm variância constante e distribuição normal ocorreram simultaneamente. Portanto, a medida corretiva, realizada ao fazer a transformação, permite fazer alterações na variável resposta p , já que são a forma e a dispersão de p que necessitam ser alteradas e também por apresentar o diagrama de dispersão da relação de regressão alguma curvatura.

4.3.2.3.1 – Ajuste do Modelo de Regressão Transformado

A reta de regressão que foi ajustada aos dados, após a transformação, é expressada por:

$$\ln \hat{p} = -4,4392 + 0,1452d$$

Cujos dados são apresentados no quadro 4.11 e seu diagrama de dispersão é apresentado na figura 4.13.

Quadro 4.11 – Atrasos (Calculados Segundo Allsop, 1981) e Logaritmo Neperiano da Poluição para o Modelo Transformado

HORÁRIOS	ATRASOS (seg.)	LN. POLUIÇÃO
11:30/11:40	40,84	1,559
11:40/11:50	39,49	1,581
11:50/12:00	39,31	1,500
12:00/12:10	34,75	0,518
12:10/12:20	40,84	1,314
12:20/12:30	38,01	1,132
13:30/13:40	43,91	1,895
13:40/13:50	39,31	1,532
13:50/14:00	45,31	2,211
14:00/14:10	42,56	1,414
14:10/14:20	41,17	1,720
14:20/14:30	38,19	1,152
17:30/17:40	38,01	0,811
17:40/17:50	39,31	0,967
17:50/18:00	36,04	0,967
18:00/18:10	35,67	0,504
18:10/18:20	36,04	0,848
18:20/18:30	46,32	2,262
Media	39,72	1,327
Sd.	3,270	0,514

Sendo que seu coeficiente de determinação R^2 é 0,8546 e seu coeficiente de regressão linear R é igual a 0,924 o qual indica que a reta de regressão da amostra ajusta-se muito bem às observações.

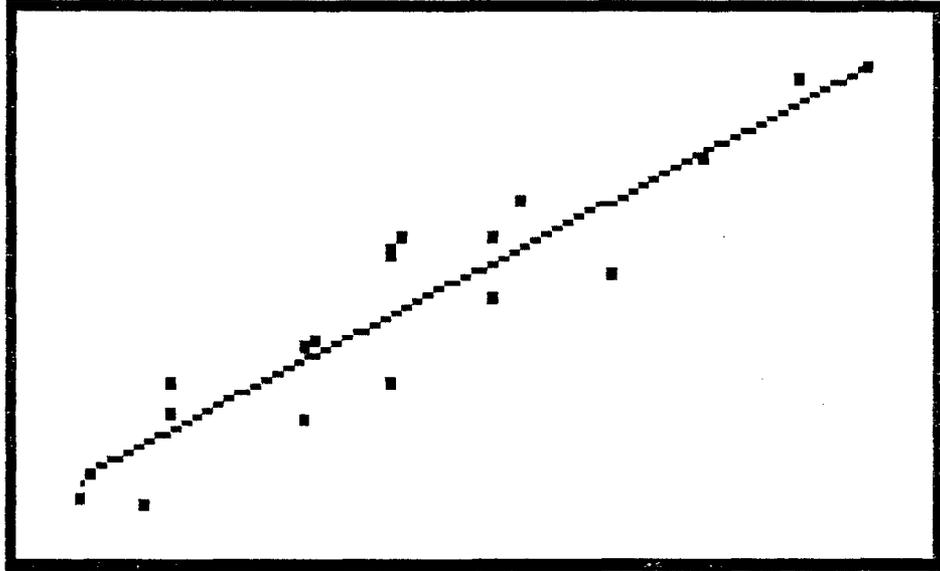


Figura 4.13: Diagrama de Dispersão (Atraso vs ln. Poluição)

Para avaliar se de fato existe um efeito linear da variável atraso (d) sobre a poluição (p), decidiu-se testar se o coeficiente β_1 da reta de regressão poderia ser igual a zero, isto é:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 > 0$$

Com nível de significação $\alpha = 5\%$.

Análise de variância está sumarizada no quadro 4.12

Quadro 4.12 - Análise de Variância do Modelo Transformado

Fontes de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F ₀
Regressão	3,833865	1	3,833865	94,029
Residual	0,652372	16	0,040773	
Total	4,486238	17		

Como $F_0 = 94,029 > F_{0,05}(1,16) = 4,49$, portanto, rejeita-se a H_0 , concluindo que $\beta_1 > 0$. Isto significa que foi possível concluir que realmente existe um efeito linear entre atraso(d) e a poluição(p).

Com o objetivo de obter faixas dos possíveis valores para os parâmetros do modelo de Regressão linear, relacionando o atraso(d) e a poluição (p), foram construídos intervalos de 95% de confiança, que são apresentados a seguir:

Intervalo de confiança para β_1 :

$$0,1135 \leq \beta_1 \leq 0,177$$

Este intervalo indicou que, para cada aumento de uma unidade no atraso(d) a poluição(p) poderia aumentar de 0,1135 a 0,177.

Intervalo de confiança para β_0^1 é:

$$-5,705 \leq \beta_0^1 \leq -3,17$$

4.3.2.3.2 – Adequação do Modelo de Regressão Transformado

Na próxima etapa será realizada a análise de resíduos, para se obter indicações sobre a adequação, ou não, do modelo ajustado.

Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados – O gráfico de resíduos contra valores ajustados é apresentado na Figura 4.14. Este gráfico foi construído a partir dos dados do quadro 4.13.

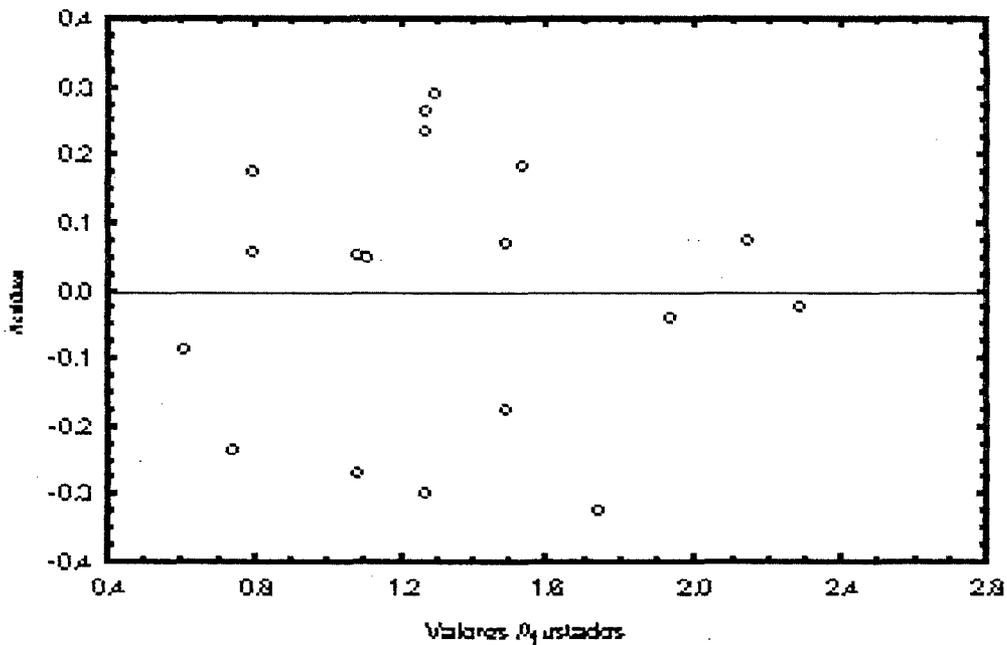


Figura 4.14: Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados do Modelo Transformado.

Quadro 4.13 - Valores Ajustados (Ln. Poluição) e Resíduos do Modelo Transformado

Nº DE CASO	VALOR AJUSTADO(Ln \hat{p})	RESÍDUO
1	1,4886	0,0704
2	1,2927	0,2887
3	1,2666	0,2332
4	0,6047	-0,0865
5	1,4886	-0,1749
6	1,0779	0,0541
7	1,9342	-0,0393
8	1,2666	0,2655
9	2,1374	0,0737
10	1,7383	-0,3241
11	1,5365	0,1839
12	1,1040	0,0475
13	1,0779	-0,2670
14	1,2666	-0,3000
15	0,7919	0,1747
16	0,7382	-0,2338
17	0,7919	0,0561
18	2,2840	-0,0222
Mínimo	0,6047	-0,3241
Máximo	2,2840	0,2887
Média	1,3270	0,0000
Mediana	1,2666	0,0508

Segundo o gráfico, da figura 4.14, os resíduos estão situados, aproximadamente, em uma faixa horizontal centrada em $e_i = 0$. Analisando o gráfico não percebeu-se qualquer indicação da presença das seguintes inadequações:

- Falta de linearidade da equação de regressão.
- Violação da condição de que os erros tenham variância constante.
- Presença de observações extremas .

Também foi testado a existência de não auto-correlação positiva e negativa nos erros, usando o teste de Durbin-Watson, cujos valores DwL e DwU para 18 observações, uma variável independente e ao nível de 5% de significância são:

$$DwL = 1,16$$

$$DwU = 1,39$$

$$(4-DwL) = 2,84$$

$$(4-DwU) = 2,61$$

O valor calculado da estatística Dw é:

$$Dw = 2,098$$

Como pode-se observar Dw calculado é maior que DwU e menor que (4-DwU). Portanto, a hipótese de não-auto-regressão ($\rho=0$) tem que ser aceita.

Normalidade dos Resíduos - A validade da suposição de normalidade dos resíduos é verificada utilizando o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, ver figura 4.15. Este gráfico foi construído a partir dos valores dos resíduos apresentados na quadro 4.13. Neste gráfico de normalidade se observa que os pontos estão em torno da reta. Para confirmar esta indicação foi realizado o

teste de Normalidade, baseado no coeficiente de correlação linear, cujo resultado é igual a 0,9784. Segundo a tabela de normalidade para $n=18$ e $\alpha = 1\%$; 5% ; 10% , os valores críticos são: 0,926; 0,951 e 0,960 respectivamente. Como todos estes valores são menores que 0,9784, conclui-se que não foram obtidas indicações de violação da suposições de normalidade.

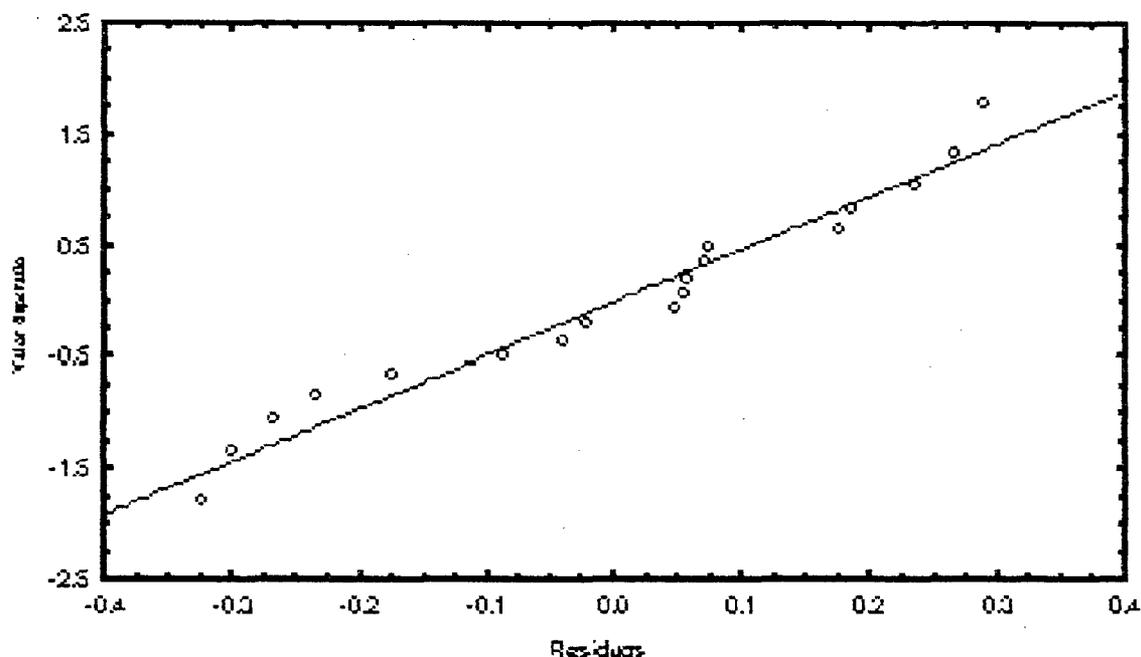


Figura 4.15: Gráfico de Normalidade dos Resíduos do Modelo Transformado

Portanto, pode-se utilizar como base para este estudo as relações atraso(d) e poluição(p) seguintes:

$$\hat{p} = -13,2232 + 0,4010d \quad (a)$$

$$\hat{p} = 0,01181e^{0,1452d} \quad \text{ou} \quad \ln \hat{p} = -4,4392 + 0,1452d \quad (b)$$

Onde o d da equação (a) corresponde ao atraso calculado segundo Webster (1958) e o d das equações de (b) correspondem ao atraso calculado segundo Allsop (1981), modelo corrigido.

Nestas relações as suposições do modelo de regressão não foram violadas, como:

- a linearidade do modelo de regressão,
- os erros têm média zero,
- os erros têm variância constante,
- os erros não são correlacionados,
- os erros têm distribuição normal.

Estas relações serão utilizadas para determinar a poluição produzida pelos planos semaforicos calculados, cujos atrasos sejam mínimos na aproximação 1, da interseção selecionada.

4.3.3 – Resumo dos Resultados do Ajuste e da Adequação dos Modelos de Regressão

Os resultados obtidos da análise de Regressão e sua adequação são apresentados em forma resumida nos quadros (14) e (15).

Quadro 4.14 - Resultados Obtidos no Ajuste dos Modelos de Regressão

Método de Cálculo do Atraso	Webster (1)	Allsop (2)	Allsop Corregido (3)
Modelos	$\hat{p}=13,2232+0,4010d$	$\hat{p}=-20,73+0,6241d$	$\hat{p}=0,01181e^{0,1452d}$ ou $\ln \hat{p}=\ln 0,01181+0,1452d$
Coefficiente de Correlação	0,898	0,864	0,924
Coefficiente de Determinação	0,807	0,74	0,855
F calculado	66,95	47,3	94,02
Intervalos de confiança	$0,29712 \leq \beta_1 \leq 0,50488$ $-17,7874 \leq \beta_0 \leq -8,6586$	$0,4331 \leq \beta_1 \leq 0,817$ $-28,453 \leq \beta_0 \leq -13,007$	$0,1135 \leq \beta_1 \leq 0,177$ $-5,705 \leq \beta_0^1 \leq -3,17$

Os três modelos ajustados apresentam tendência crescente. Os coeficientes de correlação dos modelos (1) e (3) indicam que as retas de regressão da amostra ajustam-se muito bem aos dados. O efeito linear medido pela distribuição F, está garantido para os três modelos. O modelo (3) é o modelo corrigido, este modelo surge como consequência da adequação do modelo (2), que apresenta inadequações de linearidade e falta de normalidade.

Quadro 4.15 - Resumo dos Resultados Obtidos da Adequação dos Modelos de Regressão

Métodos de cálculo dos Atrasos	Webster (1)	Allsop (2)	Allsop Corrigido (3)
Modelos	$\hat{p}=13,2232+0,4010d$	$\hat{p}=-20,73+0,6241d$	$\hat{p}=0,01181e^{0,1452d}$ ou $\ln \hat{p}=\ln 0,01181+0,1452d$
Gráfico de Resíduos Contra Valores Ajustados	-Linearidade -Variância constante dos erros -Sem observações extremas	-Não linearidade -Sem observações extremas	-Linearidade -Variância constante dos erros -Sem observações extremas
Teste Darbin-Watson	Não auto-correlação dos erros	Não auto-correlação dos erros	Não auto-correlação dos erros
Teste de Normalidade	Normalidade dos erros	Violação da normalidade a 5% e 10% de significância	Normalidade dos erros

No quadro (4.15) é resumido os resultados da adequação das linhas de regressão ajustadas, o modelo (1) e o modelo (3) adequaram-se sem problema no que se refere à linearidade variância constante dos resíduos e observações extremas. A não auto-correlação dos resíduos e a normalidade também não foram violadas.

O modelo (2) apresenta falta de linearidade, violação à normalidade dos resíduos aos níveis de 5% e 10% de significância. Portanto, para dar solução a este problema de inadequação o modelo foi aproximado a uma forma não linear crescente da forma $p=\beta_0 e^{\beta_1 d}$

que é o modelo (3). Este modelo foi transformado em uma forma aproximadamente linear usando transformação logarítmica, resultando no modelo $\ln \hat{p} = \ln 0,01181 + 0,1452d$. Este modelo como foi dito acima não apresentou nenhuma inadequação.

4.4 - CÁLCULO DA PROGRAMAÇÃO ÓTIMA DO SEMÁFORO DA INTERSEÇÃO SELECIONADA

Depois de haver adequado convenientemente as relações atraso (d) e poluição (p), o passo seguinte será dimensionar o semáforo da interseção em estudo para determinar o ciclo ótimo cujo atraso seja mínimo e logo será estimado a poluição mínima correspondente ao atraso mínimo calculado.

4.4.1 - Dimensionamento do Semáforo da Interseção Seleccionada

Para dimensionar o semáforo da interseção seleccionada, como primeiro passo serão calculados os elementos necessários para o cálculo do plano ótimo do semáforo, tais como: fluxo de saturação de cada aproximação, determinar os fluxos médios, número de estágios, número de fases dos cruzamento, tempos perdidos e taxas de ocupação. Logo, será calculado o tempo de ciclo ótimo e os tempos de verde de cada fase. Para calcular o tempo de ciclo ótimo e os tempos de verde de cada fase podem ser utilizados os dois métodos, o método de Webster e Cobbe (1966) ou o método de Allsop (1981), seguindo o procedimento mencionado na metodologia, item 3.2.6.2.

- Calcular o fluxo de saturação para cada aproximação:

$$S_1 = 4725 v_{eq}/htv.$$

$$S_2 = 3150 v_{eq}/htv.$$

$$S_3 = 3675 v_{eq}/htv.$$

- Determinar o fluxo médio por aproximação:

$$\bar{q}_1 = 818 v_{eq}/h.$$

$$\bar{q}_2 = 1470 v_{eq}/h.$$

$$\bar{q}_3 = 480 v_{eq}/h.$$

- Determinar o número de estágio – Se têm 3 estágios, ver figura 4.3.
- Determinar o número de fases do cruzamento – Se têm 3 fases no cruzamento, ver figura 4.4.

- Calcular as taxas de ocupação crítica de cada fase:

$$y_1 = y_1^* = 818/4725 = 0,1731$$

$$y_2 = y_2^* = 1470/3150 = 0,4667$$

$$y_3 = y_3^* = 480/3675 = 0,1306$$

$$Y = \sum_{i=1}^3 y_i^* = 0,7704$$

- Calcular o tempo perdido total (Tp)

$$T_p = \sum_{i=1}^3 I_i + \sum_{i=1}^3 (I - t_{ai})$$

Para o caso analisado existe vermelho total

$\sum_{i=1}^3 (I - t_{ai})$, corresponde ao vermelho total, igual a 1 segundo

I_i , é tempo perdido na fase i , mas a porção de tempo de vermelho total é igual a 3,333 segundos

então:

$$T_p = 3 * 3,333 = 10 \text{ segundos}$$

- Cálculo do tempo de ciclo ótimo e os períodos de verde de cada fase: neste cálculo foram usados os métodos de Webster e Cobbe (1966) e de Allsop (1981), apresentados no item 3.6.2.8.

a) - Método de Webster e Cobbe (1966)

O ciclo ótimo segundo Webster e Cobbe é calculado pela seguinte expressão:

$$C_0 = \frac{1,5T_p + 5}{1 - Y}$$

Substituído os valor calculados acima temos:

$$C_0 = \frac{1,5(10) + 5}{1 - 0,7704} = 87 \text{ Seg.}$$

Calcular os tempos de verde efetivo (g_{ef}):

$$g_{ef1} = y^*_1 / Y(C_0 - T_p) = 17,30 \text{ Seg.}$$

$$g_{ef2} = y^*_2 / Y(C_0 - T_p) = 46,65 \text{ Seg.}$$

$$g_{ef3} = y^*_3 / Y(C_0 - T_p) = 13,05 \text{ Seg.}$$

Calcular os tempos de verde real:

$g_i = g_{efi} + \text{tempo perdido na fase } i - \text{tempo de amarelo na fase } i$

$$g_1 = 17,30 + 3,333 - 3 = 18 \text{ Seg.}$$

$$g_2 = 46,65 + 3,333 - 3 = 47 \text{ Seg.}$$

$$g_3 = 13,05 + 3,333 - 3 = 13 \text{ Seg.}$$

b) - Método de Allsop (1981)

Neste caso é utilizado o programa SIGSET, ver item 3.2.4.2.

Dados de entrada:

▪ Fluxo médio por aproximação:

$$q_1 = 818 \text{ v}_{eq}/\text{h.}$$

$$q_2 = 1470 \text{ v}_{eq}/\text{h.}$$

$$q_3 = 480 \text{ v}_{eq}/\text{h.}$$

▪ Fluxos de saturação:

$$S_1 = 4725 \text{ veq/htv.}$$

$$S_2 = 3150 \text{ veq/htv,}$$

$$S_3 = 3675 \text{ veq/htv.}$$

▪ Tempo perdido em cada fase:

$$T_p = 3,33 \text{ Seg.}$$

▪ Tempo de ciclo máximo:

$$TC = 120 \text{ Seg.}$$

- Tempos de verde mínimo para cada fase:

10 Seg.

Resultados:

- Tempo de ciclo ótimo calculado:

$T_c = 82$ Seg.

- Tempos de verde efetivo:

$g_{ef1} = 16,41$ Seg.

$g_{ef2} = 42,14$ Seg.

$g_{ef3} = 12,57$ Seg.

- Tempo de verde real:

$g_1 = 17$ Seg.

$g_2 = 43$ Seg.

$g_3 = 13$ Seg.

Os tempos de amarelo em ambos os métodos é, 3 segundos.

Portanto, temos dois planos semaforicos ótimos, que podem ser instalados na interseção analisada, um dimensionado segundo o método de Webster e outro dimensionado segundo o método de Allsop

O resumo dos resultados do dimensionamento do semáforo pelos métodos de Webster e Cobbe (1966) e Allsop (1981) serão apresentados no quadro 4.16.

Quadro 4.16 – Resultados do Dimensionamento dos Planos Semafóricos da Interseção Selecionada

	Métodos de Dimensionamento	
	Webster	Allsop
Fluxo de Saturação (veq/htv)	4725	4725
	3150	3150
	3675	3675
Tempo Perdido (Seg.)	10	10
Tempo de Ciclo (Seg.)	87	82
Tempo de Verde Efetivo (Seg.)	17,30	16,41
	46,65	42,14
	13,05	12,57
Porção de Verde Efetivo	0,195	0,2
	0,540	0,51
	0,150	0,15
Tempo de Verde Real (Seg)	18	17
	47	43
	13	13

No quadro 4.16 são apresentados os resultados obtidos no dimensionamento do semáforo da interseção em estudo. Como se pode observar, o tempo de ciclo do plano semafórico calculado pelo método de Allsop (1981) é menor que o tempo de ciclo calculado pelo método de Webster e Cobbe (1966). Segundo Allsop (1971b) os tempos de ciclo menores têm grandes vantagens: eles dão ao pedestre oportunidades mais freqüentes de atravessar a via e reduzem a

duração do bloqueio ocasionado pela acumulação de veículos na interseção. Portanto, o método de Allsop pode ter vantagens em interseções, onde os tempos de ciclo podem ser reduzidos como é o caso da interseção selecionada.

4.4.2 – Cálculo do Atraso Produzido pelos Planos Ótimos

O atraso que precisamos calcular corresponde à aproximação 1, do cruzamento, é o atraso produzido pelo semáforo dimensionado no item 4.4.1. Portanto, pode-se calcular o atraso para o plano dimensionado segundo o método de Webster e Cobbe (1966) e o atraso para o plano dimensionado segundo Allsop (1981). O atraso em ambos os métodos é mínimo.

- O atraso para o plano dimensionado segundo Webster e Cobbe (1966), para a aproximação 1, do cruzamento é:

$$d = 44,29 \text{ Seg.}$$

- O atraso para o plano dimensionado segundo o método de Allsop (1981) é:

$$d = 39,40 \text{ Seg.}$$

4.4.3 – Previsão da Poluição Mínima para Ambos os Planos

Para fazer a previsão da poluição produzida pelos planos semaforicos dimensionados, serão utilizados dois modelos de regressão ajustados: o modelo (1) no qual foram utilizados os atrasos calculados segundo Webster e o modelo corrigido (3) no qual foram utilizados os atrasos calculados segundo Allsop.

- A poluição prevista pelo modelo (1) é:

$$4,538 \text{ ppm.}$$

- a poluição prevista pelo modelo corrigido (3) é:
3,6 ppm.

Os resultados da otimização do semáforo da interseção analisada, serão apresentados no quadro 4.17, no qual também será apresentada a programação do semáforo em operação.

Quadro 4.17 – Comparação das Programações Ótimas do Semáforo da Interseção Analisada com o Semáforo em Operação

	Métodos de Dimensionamento de Semáforos		
	Webster	Allsop	Semáforo em Operação
Tempo de Ciclo(Seg)	87	82	120
Tempo de verde efetivo (Seg)	17,30	16,41	27,00
	46,65	42,14	63,09
	13,05	12,57	18,81
Tempo de Verde Real (Seg)	18	17	28
	47	43	64
	13	13	19
Atraso(Seg) na Aprox. (1)	44,29	39,40	45,04
Poluição(ppm) na aprox. (1)	4,53	3,6	7,85
	Máximo 6,80	5,58	9,16
	Mínimo 2,27	2,32	5,36

Como pode-se observar no quadro 4.17 os tempos de ciclo de 87 e 82 segundos são tempos de ciclos ótimos calculados pelos métodos de dimensionamento de Webster (1966) e Allsop (1981),

respectivamente. Para cada tempo de ciclo ótimo, corresponde um atraso mínimo e uma poluição mínima. Para o tempo de ciclo ótimo de 87 segundos, corresponde o atraso mínimo de 44,29 segundos e uma poluição mínima de 4,53 ppm., para o tempo de ciclo de 82 segundos, corresponde o atraso mínimo de 39,40 segundos e uma poluição mínima de 3,6 ppm. Os resultados obtidos por ambos os métodos são diferentes. Esta diferença é devida ao fato de que os planos calculados por Allsop produzem atrasos menores e os tempos de ciclo também são menores, comparados com os calculados pelo método de Webster (Allsop, 1971b). Portanto, a poluição produzida pelos planos semaforicos calculados pelo método de Allsop, também é menor. Os dois planos podem ser considerados como planos ótimos, já que a poluição produzida por cada um deles está dentro dos limites de poluição permitida. O método a ser utilizado vai depender dos recursos disponíveis para cada caso. O método de Webster é um método manual, fácil de ser manipulado e pode ser utilizado em qualquer tipo de interseções, o que também acontece com o método de Allsop. O método de Allsop como foi mencionado anteriormente tem vantagem em interseções onde os tempos de ciclo podem ser reduzidos, resultando em uma apreciável redução do atraso e, portanto, em uma redução na poluição. Ambos os métodos tiveram um comportamento melhor em comparação com o plano que operava na interseção, aplicado à situação atual, cujo tempo de ciclo é 120 segundos produzindo um atraso de 45,04 segundos calculado com o método de Allsop (1981), tendo como poluição prevista de 7,85 ppm.

Finalmente, calculou-se um conjunto de planos semaforicos para um intervalo de tempos de ciclo, (ver quadro 4.18) com o objetivo de representar graficamente a posição do tempo de ciclo ótimo para seu respectivo atraso mínimo e poluição mínima, como é mostrado na figura 4.16.

Quadro 4.18 – Planos Semafóricos Calculados para Tempos de Ciclo Especificados

Tempo de Ciclo (Seg.)	Verde Efetivo (gef)			Verde Real (g)			Atraso. (Seg) Aprox.(1)	Poluição (ppm) Aprox(1)
	gef ₁	gef ₂	gef ₃	g ₁	g ₂	g ₃		
75	14,14	37,46	12,00	15,	38	13	41,82	5,10
80	15,88	40,85	12,17	17	41	13	39,79	3,78
85	17,06	43,78	13,07	18	44	14	39,86	3,82
90	18,25	46,69	13,97	19	47	15	40,73	4,35
95	19,41	49,63	14,87	20	50	16	41,90	5,16
100	20,57	52,58	15,75	21	53	17	43,20	6,24
105	21,74	55,53	16,63	23	56	17	44,52	7,54
110	22,88	58,53	17,49	24	59	18	46,03	9,4

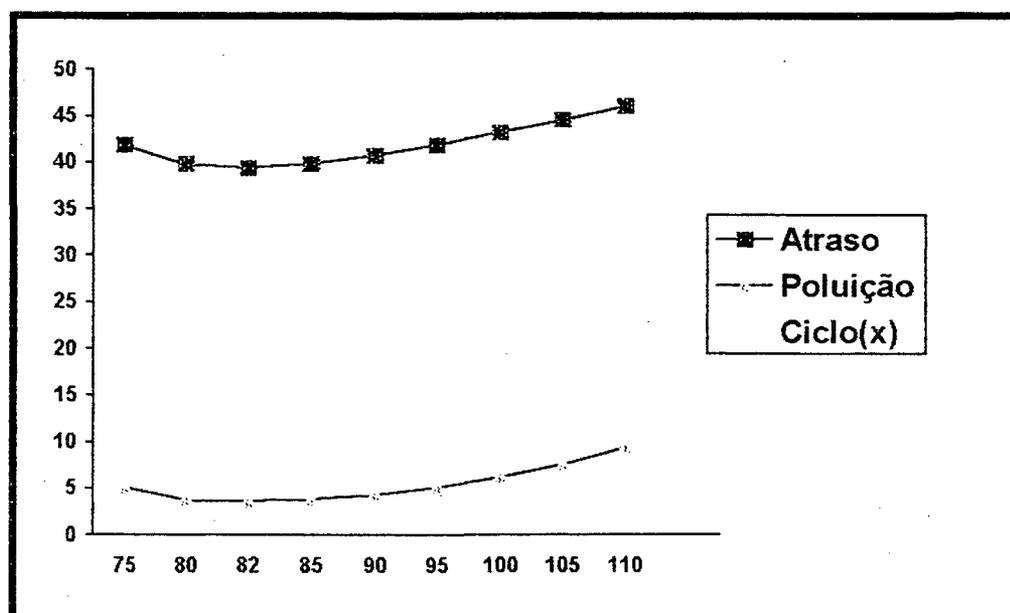


Figura 4.16: Representação Gráfica do Tempo de Ciclo Ótimo e seu Respetivo Atraso Mínimo e Poluição Mínima.

No quadro 4.18 os tempos de ciclo são especificados e mantidas as características da interseção analisada. O atraso e a poluição correspondem à aproximação (1) do cruzamento. O modelo usado na previsão da poluição é o modelo corrigido $\hat{p} = 0,01181 e^{0,1452}$, por ser o modelo que melhor se ajustou aos dados e apresentou a melhor adequação, como foi mostrado no estudo da aplicação do método proposto. Portanto, no dimensionamento dos semáforos foi utilizado o método de Allsop (1981).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho constitui-se em uma contribuição para a teoria e a prática da Engenharia de Tráfego e sua reação com o meio ambiente, em especial para o caso brasileiro. Em relação a circulação, esta contribuição se dá em função deste trabalho apresentar ferramentas que podem ajudar os técnicos da área a elaborar planos semaforicos, cujas programações sejam ótimas, considerando, além do atraso mínimo, o fator poluição. Isto é, será considerado como um plano ótimo, aquele plano cuja poluição produzida seja mínima e esteja dentro dos limites de poluição permitida. O uso do fator poluição no cálculo de planos semaforicos operando a tempo fixo, modo isolado é uma questão inédita do trabalho desenvolvido. Com respeito à poluição atmosférica, a referida contribuição está ligada à forma como a metodologia proposta permite elaborar planos semaforicos que a considerem, levando com isto, ao melhoramento da qualidade do ar nas interseções sinalizadas por semáforo, já que a maior quantidade de poluentes ocorrida nas ruas ou estradas como consequência do tráfego é nos cruzamentos (Matzoros, 1992). Portanto, instalar um semáforo sem considerar o critério grau de poluição, corre-se um sério risco de

estar adotando soluções que venham aumentar os problemas frente a questão ambiental.

O trabalho em seu desenvolvimento leva em conta três variáveis importantes: demanda de tráfego, grau de poluição medido em concentrações de CO e atraso produzido pelos veículos que passam pela interseção analisada. A demanda de tráfego e a poluição são variáveis observadas em horários de pico e nos mesmos intervalos de tempo e a variável atraso veicular é uma variável calculada, utilizando-se para isto, os dois métodos mencionados na metodologia: método de Webster (1958) ou o método de Allsop (1981). Com estas variáveis disponíveis, pode-se estabelecer a relação atraso e poluição.

As possíveis relações atraso e poluição estabelecidas nesta metodologia podem ser lineares ou não lineares. Se for uma relação não linear, é necessário uma transformação para uma forma aproximadamente linear, já que é quase impossível ajustar diretamente um modelo não linear quando aplicados os mínimos quadrados.

Tendo sido a relação atraso e poluição devidamente ajustada aos dados, foi possível otimizar o semáforo da interseção. Na otimização do semáforo, foi incluída a variável poluição, obtendo-se finalmente um semáforo cuja tempo de ciclo é ótimo e que produz os menores atrasos e a menor poluição.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método proposto, para o caso específico da interseção analisada, revelaram que a relação atraso calculado segundo Webster (1958) e poluição foi de forma linear crescente, o que permitiu dimensionar diretamente o semáforo. Para o caso da relação atraso calculado segundo Allsop

(1981) e poluição foi observado inadequações no modelo, o que induziu a fazer uma aproximação a uma forma não linear, tendo um novo modelo o qual apresenta boa adequação aos dados. No dimensionamento do semáforo, foram utilizados os dois métodos mencionados na metodologia: o método de Webster e Cobbe (1966) e o método de Allsop (1981). Ambos os planos dimensionados são considerados como planos ótimos, já que a poluição produzida por eles está dentro dos limites dos padrões de poluição permitidos e são os planos que produzem a mais baixa poluição.

A metodologia desenvolvida permite definir como se pode prever a quantidade de poluição que um semáforo pode produzir, em um determinado ponto de observação da interseção, onde está operando, possibilitando tomar decisões sobre seu funcionamento. Portanto, obteve-se um método tecnicamente definido e estruturado, capaz de resolver adequadamente os objetivos propostos.

5.2 - RECOMENDAÇÕES

O método elaborado na presente pesquisa deve ser utilizado para casos de semáforos isolados, operando a tempo fixo. Os fluxos veiculares e as concentrações de CO devem ser observados em horários de pico, para evitar distorções nos resultados.

Recomenda-se, realizar análises estatísticas periódicas dos fluxos veiculares na área controlada para verificar se os fluxos veiculares sofreram alguma mudança e portanto, a quantidade de CO produzida e determinar a validade do plano que está em uso.

Para futuros estudos a respeito do assunto, recomenda-se a adaptação do método proposto aqui para semáforos sincronizados observados em períodos fora do horário de pico.

Recomenda-se, também, a elaboração de um software para facilitar os cálculos desenvolvidos no processo da metodologia. Para tanto, pode ser utilizado como método de dimensionamento o método de Webster e Cobbe (1966), uma vez que todos os procedimentos deste método estão disponíveis na metodologia proposta.

E finalmente em relação à cidade de Florianópolis, recomenda-se que os engenheiros de tráfego levem em conta a importância do tempo de ciclo e das repartições verde e vermelho de um semáforo, na produção de poluentes. Como mostra a presente tese, um semáforo programado inadequadamente produz altos níveis de poluição. Os resultados alcançados na aplicação da metodologia proposta mostraram que o semáforo que operava na interseção estudada produz mais do dobro de poluição, medido em concentrações de CO, que o semáforo otimizado pelo método proposto. Resultados suficientes para preocupar-se e tomar as medidas convenientes.

ANEXO

Quadro A-1 – Dados observados na Rua Heitor Luz, 1998

Planilha de Levantamento de Dados			
Mês: Novembro			
Semana: 2 ^{da}			
Dia: Terça Feira			
Horário	Veículos/10 min (n ^o)	Veículos/h (n ^o)	CO ppm
7:30/7:40	110	660	5,750
7:40/7:50	108	648	7,985
7:50/8:00	142	852	6,196
8:00/8:10	127	762	1,240
8:10/8:20	125	750	1,202
8:20/8:30	115	690	5,604
8:30/8:40	x	x	4,575
8:40/8:50	x	x	8,223
8:50/9:00	x	x	2,706
9:00/9:10	121	726	4,277
9:10/9:20	x	x	2,344
9:20/9:30	x	x	2,198
9:30/9:40	x	x	0,970
9:40/9:50	x	x	4,101
9:50/10:00	x	x	5,264
10:00/10:10	139	834	5,889
10:10/10:20	x	x	2,915
10:20/10:30	x	x	3,541
10:30/10:40	x	x	2,440
10:40/10:50	x	x	4,320
10:50/11:00	x	x	3,280
11:00/11:10	120	720	1,470
11:10/11:20	x	x	3,600
11:20/11:30	x	x	3,516
11:30/11:40	125	750	4,754
11:40/11:50	137	822	4,862

11:50/12:00	121	726	4,474
12:00/12:10	103	618	1,679
12:10/12:20	140	840	3,720
12:20/12:30	107	642	3,102
12:30/12:40	x	x	3,310
12:40/12:50	x	x	3,656
12:50/13:00	x	x	6,379
13:00/13:10	127	762	10,747
13:10/13:20	x	x	5,486
13:20/13:30	x	x	4,605
13:30/13:40	159	954	6,652
13:40/13:50	136	816	6,628
13:50/14:00	165	990	9,126
14:00/14:10	153	918	4,113
14:10/14:20	146	876	5,587
14:20/14:30	114	684	3,163
14:40/14:50	x	x	2,228
14:50/15:00	x	x	2,225
15:00/15:10	131	786	2,397
15:10/15:20	x	x	2,109
15:20/15:30	x	x	1,591
15:30/15:40	x	x	2,927
15:40/15:50	x	x	1,952
15:50/16:00	x	x	1,521
16:00/16:10	124	744	1,944
16:10/16:20	x	x	1,987
16:20/16:30	x	x	2,145
16:30/16:40	x	x	5,015
16:40/16:50	x	x	2,073
16:50/17:00	x	x	1,922
17:00/17:10	123	738	2,554
17:10/17:20	x	x	2,582

17:20/17:30	x	x	2,670
17:30/17:40	128	768	2,250
17:40/17:50	136	816	2,629
17:50/18:00	129	774	2,629
18:00/18:10	111	666	1,656
18:10/18:20	134	804	2,335
18:20/18:30	169	1014	3,158
18:30/18:40	x	x	1,481
18:40/18:50	x	x	2,719
18:50/19:00	x	x	1,615
19:00/19:10	115	690	3,663
19:10/19:20	x	x	6,192
19:20/19:30	x	x	5,156
19:30/19:40	x	x	2,819
19:40/19:50	x	x	1,930
19:50/20:00	x	x	2,528
20:00/20:10	114	684	1,359
20:10/20:20	x	x	1,204
20:20/20:30	x	x	1,117
20:30/20:40	x	x	1,084
20:40/20:50	x	x	1,860
20:50/21:00	x	x	2,826
21:00/21:10	108	648	3,443
21:10/21:20	x	x	3,748
21:20/21:30	x	x	3,822

Fonte: Carneiro (1998)

Quadro A-2 – Fluxos Veiculares Observados no Cruzamento Heitor Luz e Mauro
Ramos, 1999

Mês: Novembro			
Semana: 2 ^{da}			
Horários: De Pico			
Horários	Aproximação 1	Aproximação 2	Aproximação 3
	Largura: 9 m	Largura: 6 m	Largura: 7 m
Segunda Feira			
11:30/11:40	102	245	79
11:40/11:50	126	248	71
11:50/12:00	138	254	74
12:00/12:10	141	247	79
12:10/12:20	117	236	74
12:20/12:30	222	218	80
13:30/13:40	134	216	72
13:40/13:50	159	244	82
13:50/14:00	154	256	88
14:00/14:10	141	261	92
14:10/14:20	148	267	95
14:20/14:30	1128	232	83
17:30/17:40	125	237	76
17:40/17:50	139	248	87
17:50/18:00	126	262	83
18:00/18:10	124	269	85
18:10/18:20	141	246	84
18:20/18:30	152	225	73

Terça feira			
11:30/11:40	126	235	76
11:40/11:50	138	246	78
11:50/12:00	124	261	75
12:00/12:10	105	252	74
12:10/12:20	144	244	76
12:20/12:30	110	186	83
13:30/13:40	145	221	75
13:40/13:50	155	249	84
13:50/14:00	168	256	81
14:00/14:10	155	246	93
14:10/14:20	150	261	80
14:20/14:30	117	252	78
17:30/17:40	131	244	89
17:40/17:50	138	254	85
17:50/18:00	130	245	91
18:00/18:10	113	249	83
18:10/18:20	135	259	77
18:20/18:30	171	241	72

Quarta feira			
11:30/11:40	117	248	81
11:40/11:50	125	251	76
11:50/12:00	135	256	73
12:00/12:10	125	247	78
12:10/12:20	105	239	72
12:20/12:30	140	223	76
13:30/13:40	149	218	76
13:40/13:50	141	242	80
13:50/14:00	164	258	85
14:00/14:10	159	256	84
14:10/14:20	143	264	93
14:20/14:30	131	227	89
17:30/17:40	132	235	73
17:40/17:50	127	249	88
17:50/18:00	132	264	84
18:00/18:10	121	261	76
18:10/18:20	136	251	81
18:20/18:30	161	231	74

Quinta Feira			
11:30/11:40	126	239	74
11:40/11:50	135	231	71
11:50/12:00	127	254	79
12:00/12:10	137	251	80
12:10/12:20	131	231	78
12:20/12:30	132	225	72
13:30/13:40	161	233	70
13:40/13:50	134	246	87
13:50/14:00	146	249	83
14:00/14:10	146	267	91
14:10/14:20	156	263	96
14:20/14:30	123	241	84
17:30/17:40	127	227	77
17:40/17:50	141	251	82
17:50/18:00	124	268	86
18:00/18:10	116	263	85
18:10/18:20	130	231	79
18:20/18:30	143	236	81

Sexta Feira			
11:30/11:40	121	241	73
11:40/11:50	135	253	80
11:50/12:00	127	257	74
12:00/12:10	114	246	71
12:10/12:20	137	241	76
12:20/12:30	121	231	82
13:30/13:40	149	217	79
13:40/13:50	146	241	83
13:50/14:00	151	257	90
14:00/14:10	152	263	81
14:10/14:20	140	264	88
14:20/14:30	121	230	83
17:30/17:40	119	232	74
17:40/17:50	137	253	87
17:50/18:00	139	268	76
18:00/18:10	131	264	79
18:10/18:20	136	253	73
18:20/18:30	149	226	75

BIBLIOGRAFIA

AGUIAR, S.; F.B. DRUMOND e M.C. WERKEMA. Análise de Variância: Comparação de Varias Situações. Fundação Christiano Ottoni, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

ALLSOP, R.E. Delay-minimizing Settings for Fixed-time Traffic Signals at a Single Road Junction. Journal of the Institute for Mathematics and its Applications, 8, p. 164-185, 1971a.

ALLSOP, R.E. A Computer Program for Calculating Traffic Signal Settings. Traffic Engineering Control, v. 13, n. 2, p. 58-60, 1971b.

ALLSOP, R.E. Computer Programa Sigset for Calculating, Delay-Minimizing Traffic Signal Timings. Description and Manual for Users, University College London, 1981.

BEZERRA, M. C. L. O Planejamento de Transporte Urbano como Instrumento de Controle de Poluição de Ar e Sonora devido à Circulação de veículos Automotores. Tese de mestrado. Sc IAU/UnB, Distrito Federal. 1988.

BENN, F. R. e C. A. McAULIFFE. Química e Poluição. EDUSP, 1981.

BOX, G. E. e P.W. TIDWELL. Transformation of the Independent Variables. Technometrics, v. 4, n.4 p. 531-550, 1962.

BOX, G. E. e D. R. COX. An Analysis of Transformations. Journal of the Royal Statistical Society, serie B, v. 26, n. 2, p. 211-243, 1964.

BUCHANAN, C. D. Traffic in Towns, a Study of the Long Term Problems of Traffic in Urban Areas. Londres: HMSO, 1963.

CALZADA, B. J. Metodos Estadisticos para la Investigación. Editora Jurídica S.A., Lima, Perú, 1970.

CARNEIRO, G. Tráfego. Monóxido de Carbono e Ruído em Áreas Urbanas. Dissertação de mestrado, UFSC, 1998.

CETESB. Inventario de Emissão Veicular: Metodologia de Cálculo. São Paulo, 1985.

CETESB. Relatório Anual de Qualidade do Ar. São Paulo, 1996

CET-SP. Manual de Sinalização Urbana. 1978.

CHATTERJEE, S. e B. PRINCE. Regression Analysis by Example. John Wiley e Sons, Inc., New York, 1977.

CHIQUETTO, S. L. Proposta Metodológica para Avaliação da Capacidade Ambiental em Áreas Urbanas sob a Ótica da Contaminação Atmosférica Provocada pela Circulação de Veículos Automotores. Tese de Mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

CLAGGETT, M. ; J. SHROCK e K. NOLL. Carbon monoxide near an urban intersection. Atmospheric Environment, n.15, p. 1633-1642, 1981.

COCHRAN, W.G. e G.M. COX. Experimental Design. 2^a ed., John Wiley e Sons, New York, 1957.

COHN, L. F. e G.R. McVOY. Environmental analysis of transportation systems. John Wiley e Sons, New York, 1982.

CONTRAN-DENATRAN. Manual de Semáforos, 1979.

CORTESE, A. D. Clearing the air. Environmental Science and Technology, n.24, p. 42, 1990.

CROMPTON, D. e D. GILBERT. Environmental Capacity and Traffic Management: Case Study of a District of London, Imp. College, 1978.

DENNIS R. e W. NIGEL. The effects of CO-ordinated and isolated signal control on journey times and exhaust emissions along the A12 in London. Traffic Engineering Control, v.37, n.1, p. 4-9, Janeiro, 1996.

DRAPER, N.R. e H. Smith. Applied Regression Analysis. John Wiley e Sons, Inc., New York, 1966.

EPA (Environmental Protection Agency) . National air pollutant emission estimates 1940-1987. EPA-450/4-88-022. USEPA, Washington, DC. 1989..

FREITAS, I.M.D.P. Método para Determinação da Capacidade Ambiental em Vias Urbanas: O Caso das interseções Semaforizadas. Tese de mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991

HOROWITZ J. Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning. MIT Press, London, 1982.

KMENTA, J. Elementos de Econometria, 2ª ed. Editora Atlas S.A., São Paulo, 1990.

LEVIN, J. Estatística Aplicada a Ciências Humanas. Editora HARBRA & ROW, São Paulo, 1978.

LILLIEFORS, H.W. On the Kolmogorov-Smirnov test for Normality with mean and variance unknown. Journal of the American Statistical Association, n. 62, p. 399-402, 1967.

LUSTOSA, B. J. O Controle de Tráfego em Áreas Urbanas; os Planos de Sinalização. Tese de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1981.

MARTINS, J. A. Transporte, Uso do Solo e Auto-Sustentabilidade. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

MATZOROS A. e D. VAN VLIET.. A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control: Part I-Model description. Transportation Research A, v. 26A, n. 4, p.315-330, 1992.

MATZOROS, A. e V. DIRCK. A model of air pollution from road traffic, based on the characteristics of interrupted flow and junction control – Part II: Model results. Transportation Research A, v. 26, n. 4, p. 331-355, 1992.

MAUGHAN, R. A et alli – An Analysis of the Frequency Distribution of Socher Derived Mexing Hughts Classified by Atmospheric Stability. Atmospheric Environment, p. 1218-1228, 1982.

MAZEN I. HASSOUNAH. Modelling air pollution from road traffic: a review. Traffic Engineering Control, v.35, n.9, p.510-514, Setembro, 1994.

MICHAEL A.; BULL e R. ZIMMANN. Traffic emission data for air quality reviews. Traffic Engineering Control, v.38 p. 470-472, Setembro, 1997.

MONTGOMERY, D.C. e E. A. PECK. Introduction to Linear Rrgression Analysis, 2^a ed. John Wiley e Sons, Inc., New York, 1992.

MURGEL, E. M. Veículos automotores. O proálcool e a qualidade do ar. Confederação Nacional da Industria, Rio de Janeiro. 1990.

NISHIOKA S. Traffic pollution: Control policy and research trend in Japan. Transportation Research, v. 23A, p. 73, 1989.

OTA (Office for Technology Assessment). Next steps for reducing urban ozone. Office for Technology Assessment, Washington, DC. OTA-0-412, p. 3-26, 1989.

PASQUILL, F. Atmospheric Diffusion: The Dispersion of windborne Material from Industrial and Other Sources. 2nd. edition. Ellis Horwood, Chichester, U.K., 1974.

PATTAS, K.e Z. SAMARAS. Atmospheric Pollution from Traffic in Athens: Analysis and Future Perspectives. Laboratory of Applied Thermodynamics, University of Thessaloniki, Greece, 1990.

PATTERSON, R. M. e E. L. MEYER. An approach for relating traffic to ambient CO concentration at signalised intersections. Paper presented at the 68th Annual Meeting of Air Pollution Control Association, on 15-20/6/75, Boston, Massachusetts. Paper number 75-44.4, 1975.

POTTER, C. J. and C. A. SAVAGE. A survey of gaseous pollutant emissions from tuned in-service gasoline engined cars over a range of road operating conditions. Warren Spring Laboratory report number LR 447 (AP) M. Stevenage, Hertfordshire, United Kingdom, 1983.

POTTER, C. J. and C. A. SAVAGE. The determination of in-service vehicle gaseous emissions over a wide range of road operating conditions. Warren Spring Laboratory report number LR 442 (AP) M. Stevenage, Hertfordshire, United Kingdom, 1982.

RIBEIRO, U. P. Qualidade do Ambiente e seus Efeitos Ecológicos e Sociais. Brasília, MINTER, 1977.

RIBEIRO, P.C.M. Influence of Flow Variation on Fixed-Time Signal Control. Tese de Doutorado. University College London, 1991.

ROBERTSON, D. I.; C. F. LUCAS e R. T. BAKER. Coordinating traffic signals to reduce fuel consumption. TRRL Laboratory Report 934. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1980.

ROBERTSON, D. I. TRANSYT: A traffic network study tool. RRL Report LR253, Road Research Laboratory, Crowthorne, 1969.

SANTOS, R.M.G. Análise da Dispersão Atmosférica e Impacto das Emissões de Usinas Térmicas a Carvão. Tese de mestrado COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1985.

SANTOS, M O Espaço Geográfico como Categoria Filosófica in o Espaço em Questão. Série Terra Livre, n. 5, São Paulo: AGB, p. 9-20, 1988.

TEXIER, P.Y. La Régulation de la Circulation en Milieu Urbain. Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n. 548, Dezembro, 1978.

VARELLA, F. O limite de uma civilização. Veja, São Paulo, n 32, 49-53, 7 Agosto, 1996.

VINCENT, R.A. e J. R. PEIRCE. "MOVA": Traffic responsive, self-optimizing signal control for isolated intersection. TRRL Research Report RR 170. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1988.

WEBSTER, F. V. e B. M. COBBE. Traffic signals. Road Research Technical Paper No 56. HMSO, London, 1966.

WEBSTER, F.V. Traffic signal settings. Road Research Technical Paper No. 39. HMSO, London, 1958.

WHO. Motor vehicle air pollution: public health impact and control measure. World Health Organization Geneva, Switzerland, 1992a.

WHO. Urban air pollution in megacities of the world. World Health Organization Oxford, UK. 1992b.