



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



ANÁLISE DO CICLO SEMAFÓRICO DE UMA INTERSEÇÃO EM BELÉM-PA

BRUNO ENRIQUE MARTINS PINHEIRO
LETÍCIA GABRIELY HOMEM MATOS

BELÉM - PA
2024

BRUNO ENRIQUE MARTINS PINHEIRO
LETÍCIA GABRIELY HOMEM MATOS

ANÁLISE DO CICLO SEMAFÓRICO DE UMA INTERSEÇÃO EM BELÉM-PA

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,
do Instituto Tecnológico da Faculdade de
Engenharia Civil da UFPA, como requisito
parcial de avaliação para conclusão do
curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinícius Guerra
Seraphico de Assis Carvalho.

**BELÉM - PA
2024**

BRUNO ENRIQUE MARTINS PINHEIRO

LETÍCIA GABRIELY HOMEM MATOS

**Análise do Ciclo Semafórico de uma Interseção em Belém-
Pa.**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado
ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto
Tecnológico da Faculdade de Engenharia Civil
da UFPA, como requisito parcial de avaliação
para conclusão do curso de Engenharia Civil.

Belém, 29 de novembro de 2024

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

MARCUS VINICIUS GUERRA SERAPHICO DE ASSI

Data: 05/12/2024 10:02:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho

ITEC/UFPA

(Orientador)



Documento assinado digitalmente

MARCELO FIGUEIREDO MASSULO AGUIAR

Data: 05/12/2024 10:06:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar

ITEC/UFPA



Documento assinado digitalmente

CHRISTIANE LIMA BARBOSA

Data: 05/12/2024 11:52:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Christiane Lima Barbosa

ITEC/UFPA

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, pela dádiva da vida e pela força que me deu para superar todos os obstáculos ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço imensamente à minha mãe, esposa, irmãs, tias e aos meus queridos amigos da faculdade, que, com seus constantes incentivos, estiveram ao meu lado nos momentos mais desafiadores do curso.

Aos professores, minha sincera gratidão pelas correções e ensinamentos valiosos que contribuíram significativamente para o meu crescimento acadêmico e profissional.

De forma especial, sou grato ao meu orientador, que guiou este trabalho com imensa paciência e dedicação, sempre disposto a compartilhar seu vasto conhecimento, o que foi fundamental para o sucesso desta pesquisa.

Em primeiro lugar agradeço a Deus por permitir que meus objetivos fossem alcançados ao longo de todos os anos dedicados aos estudos.

Sou profundamente grata aos meus pais, Eliane Santana Homem e Maikon de Oliveira Matos, por sempre me apoiarem incondicionalmente e por se dedicarem para que eu tivesse as ferramentas necessárias para realizar meus sonhos.

Estendo minha gratidão ao meu irmão, Maikon Gabriel Homem Matos, e aos meus avós, Izabel do Socorro, Maria de Lourdes, Manoel Matos, e ao meu querido avô, já falecido, Inácio Homem, que foram fontes de força e confiança em toda essa trajetória.

Agradeço também aos meus amigos, especialmente Uesley Oliveira, Henderson Machado e Wellen Bergeron, que estiveram comigo nos momentos mais desafiadores e nos mais felizes, compartilhando lembranças que guardarei para sempre.

Minha gratidão também ao meu saudoso primo Rafael Homem, que sempre teve um papel especial em minha vida.

Agradeço à Universidade Federal do Pará, por oferecer um ensino de excelência e oportunidades ímpares, bem como à SESAN (Secretaria Municipal de Saneamento e Infraestrutura), onde tive a chance de aprender e crescer durante o estágio, com o auxílio e suporte dos engenheiros que lá conheci.

Minha gratidão ao orientador Dr. Marcus Vinicius, pela dedicação e pelo tempo investido na concretização deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha família, aos colegas de classe, aos professores e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, tornando essa jornada possível e significativa.

Letícia Gabriely Homem Matos

RESUMO

PINHEIRO, Bruno; MATOS, Letícia. Análise do Ciclo Semafórico de uma Interseção em Belém-PA. 2024. 56 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

Um dos vastos desafios para os Engenheiros de tráfego é promover a mobilidade urbana das grandes cidades. Uma das formas de alcançar tal objetivo é a otimização de interseções semaforizadas, para promover deslocamentos seguros, com reduzidos números de atrasos. Este estudo teve como objetivo principal analisar uma interseção semaforizada situada entre a Avenida José Bonifácio e a Travessa Antônio Baena na cidade de Belém do Pará. Para verificar o ciclo semafórico e avaliar os atrasos em cada aproximação da interseção, foram realizadas contagens de fluxo veicular utilizando o fator de equivalência da SEMOB (Superintendência de Mobilidade Urbana), além da determinação de fluxos de saturação, taxas de ocupação e filas de demanda reprimida nos semáforos. Essas análises seguiram os critérios estabelecidos nos seguintes documentos técnicos: Boletim Técnico 31 da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET, 1977), Highway Capacity Manual (HCM, 2010) e Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (CONTRAN, 2022). Após o estudo da interseção pôde-se perceber que o seu ciclo semafórico atual (144 segundos) não é satisfatório; a soma de suas aproximações apresenta uma taxa de ocupação elevada (acima de 90%), além de filas de retenção.

Para atenuar os problemas identificados, foram realizados cálculos de novos ciclos semafóricos utilizando dois métodos. O método de Webster, amplamente aplicado em condições normais de tráfego, apresentou um valor inviável devido ao ciclo excessivamente longo. Em contrapartida, o método do CET, específico para vias congestionadas, gerou um resultado viável, com um ciclo de 174 segundos, garantindo maior eficiência e fluidez no tráfego da interseção.

Palavras Chaves: Interseção semaforizada; Ciclo Semafórico; Fator de Equivalência.

ABSTRACT

PINHEIRO, Bruno; MATOS, Letícia. Analysis of the Traffic Signal Cycle at an Intersection in Belém, PA. 2024. 56 p. Graduation Project (Bachelor's Degree in Civil Engineering) – Faculty of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém.

One of the major challenges for traffic engineers is to promote urban mobility in large cities. One way to achieve this goal is to optimize traffic signalized intersections to promote safe travel with reduced delays. The main objective of this study was to analyze a traffic signalized intersection located between Avenida José Bonifácio and Travessa Antônio Baena in the city of Belém do Pará. To verify the traffic signal cycle and evaluate delays at each intersection approach, vehicle flow counts were performed using the SEMOB (Superintendence of Urban Mobility) equivalence factor, in addition to determining saturation flows, occupancy rates and queues of pent-up demand at traffic lights. These analyses followed the criteria established in the following technical documents: Technical Bulletin 31 of the Traffic Engineering Company (CET, 1977), Highway Capacity Manual (HCM, 2010) and Brazilian Traffic Signaling Manual (CONTRAN, 2022). After studying the intersection, it was possible to see that its current traffic light cycle (144 seconds) is not satisfactory; its approximations present an occupancy rate (above 90%), in addition to retention queues.

To mitigate the problems identified, calculations of new traffic light cycles were carried out using two methods. The Webster method, widely applied in normal traffic conditions, presented an unfeasible value due to the excessively long cycle. In contrast, the CET method, specific for congested roads, generated a viable result, with a cycle of 174 seconds, ensuring greater efficiency and fluidity in traffic at the intersection.

Key Words: Traffic light intersection; Traffic light cycle; Equivalence factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Avenida Antônio Baena	31
Figura 2 - Avenida José Bonifácio	31
Figura 3 - Diagramas de estágios da aproximação 1 e 2 respectivamente	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de Equivalência SEMOB	21
Tabela 2 – Classificação dos Níveis de Serviço	25
Tabela 3 - Ciclo Semafórico Existente.....	33
Tabela 4: Dados obtidos in loco para auxiliar os cálculos.....	34
Tabela 5 - Veículos contabilizados na aproximação 1.....	36
Tabela 6 - Veículos contabilizados na aproximação 2	37
Tabela 7- Somatória dos fluxos por aproximação considerando o fator de equivalência da SEMOB.....	38
Tabela 8- Cálculo do Fator de Hora de Pico considerando o fator de equivalência da SEMOB	38
Tabela 9: Fluxos determinados utilizando Fator de Equivalência da SEMOB ..	39
Tabela 10: Cálculo do Hm e Fsat por faixa para a aproximação 1.	39
Tabela 11: Cálculo do Hm e Fsat por faixa para a aproximação 2.....	39
Tabela 12: Resultado dos cálculos das taxas de ocupação.	40
Tabela 13 - Ciclos Semafóricos calculados.	41
Tabela 14: Resultados dos cálculos para encontrar os tempos de verde mínimos.	43
Tabela 15: Resultados dos cálculos para encontrar os novos tempos de ciclo.	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- ciclo atual das duas aproximações.	34
Gráfico 2 - Representação gráfica dos veículos contabilizados na aproximação 1.....	36
Gráfico 3 - Representação gráfica dos veículos contabilizado na aproximação 2.	37
Gráfico 4- Ciclo ótimo de acordo com a SEMOB.	41
Gráfico 5 – Novo Ciclo ótimo para a interseção	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EB	Método Empírico de Bayes
FDSV	Funções de desempenho de segurança viária
FHP	Fator Horário de Pico
HCM	Highway Capacity Manual
PCE	Passenger car equivalent
SEMOB	Superintendência de Mobilidade Urbana de Belém
UCP	Unidades de carros de passeio
VDMA	Volume diário médio anual
VH	Volume Horário
VHP	Volume Horário de Projeto
VMD	Volume Médio Diário
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego
NS	Nível de Serviço

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	16
2.1 SOBRE ENGENHARIA DE TRÁFEGO E ESTUDO DE TRÁFEGO	16
2.2 VOLUME DE TRÁFEGO	17
2.2.1 VARIAÇÕES DOS VOLUMES DE TRÁFEGO	17
2.2.2 VOLUME DE TRÁFEGO EQUIVALENTE	18
2.3 PLANEJAMENTO DE TRÁFEGO	18
2.4 TEMPO SEMAFORIZADO	19
2.4.1 TEMPO DE RESPOSTA	19
2.5 FLUXO DE SATURAÇÃO	20
2.6 FATOR DE EQUIVALÊNCIA	21
2.7 TAXA DE OCUPAÇÃO	21
2.8 CICLOS SEMAFORIZADOS	22
2.8.1 MÉTODO WEBSTER	22
2.9 CAPACIDADE E GRAU DE SATURAÇÃO	23
2.10 ESPERA MÉDIA E NÍVEL DE SERVIÇO	24
2.11 REPROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA (semáforo muda de acordo com o horário de pico)	25
2.12 CICLOS PARA NOVOS TEMPOS DE VERDE PARA REPROGRAMAÇÃO DE SEMÁFOROS	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 ESCOLHA DA INTERSEÇÃO SEMAFORIZADA	30
3.1.1 AVENIDA ANTÔNIO BAENA	31
3.1.2 AVENIDA JOSÉ BONIFÁCIO	31
3.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS	32
3.2.2 HORA DE PICO	32
3.2.3 CICLO SEMAFÓRICO	33
3.2.4 FLUXO DE SATURAÇÃO	34
3.2.5 APROXIMAÇÃO CONGESTIONADA	35
3.3 ANÁLISE DE DADOS	35
4 RESULTADOS GERAIS DA PESQUISA E ANÁLISE DOS DADOS	36
4.1 CONTAGEM DOS VEÍCULOS	36

4.2 HORA DE PICO	37
4.3 DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS	38
4.4 FLUXO DE SATURAÇÃO	39
4.5 TAXA DE OCUPAÇÃO	40
4.6 CICLO SEMAFÓRICO	40
4.6.1 CICLO ÓTIMO	41
4.7 CAPACIDADE E GRAU DE SATURAÇÃO.....	41
4.8 ESPERA MÉDIA E NÍVEL DE SERVIÇO.....	42
4.9 APROXIMAÇÃO CONGESTIONADA	43
4.10 CÁLCULO DOS NOVOS TEMPOS DE CICLO DE VERDE.....	43
4.11 CÁLCULO DAS NOVAS CAPACIDADES E GRAU DE SATURAÇÃO	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS.....	47
APÊNDICE A – Cálculo para Ciclo Semafórico – Método de Webster	50
APÊNDICE B – Cálculo para Ciclo Semafórico – Método de CET	52

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Beyer (2016), a expansão da frota automobilística e a priorização do transporte particular tendem a gerar problemas no sistema de trânsito, tornando necessário um planejamento urbano eficiente que atenda às mudanças previstas a longo prazo. A busca pela mobilidade urbana tem sido o foco dos engenheiros de tráfego nos grandes centros urbanos, com soluções diferenciadas, dentre elas o incentivo ao transporte coletivo e não motorizado, em detrimento do transporte individual, conforme estabelece a Lei de Mobilidade Urbana (BRASIL, 2012).

As interseções são pontos importantes de um sistema viário. Nelas, ocorrem diversos tipos de conflitos que devem ser adequadamente separados para que os fluxos de veículos e pedestres aconteçam de forma segura e fluida, evitando grandes atrasos e congestionamentos. Esses conflitos se classificam em três categorias principais: convergência, quando fluxos de tráfego se juntam, como em rampas de entrada; divergência, quando o fluxo se separa, como em bifurcações; e cruzamento, quando fluxos opostos se encontram, apresentando maior risco de colisão. Segundo o Manual de Segurança Viária do DER-SP, uma interseção simples de quatro ramos podem existir até 16 pontos de conflitos de convergência, 16 de divergência e 32 de cruzamento (DER-SP, 2023). A gestão eficiente desses conflitos é essencial para a segurança viária, como também destacado pelo Highway Capacity Manual (HCM, 2010), que enfatiza o papel dos dispositivos de controle, como semáforos e rotatórias, na redução dos riscos de acidentes e na otimização do fluxo.

Em função dos tipos e da quantidade de conflitos existentes, em um sistema viário podem ser encontrados dois tipos de interseções: não semaforizadas e semaforizadas. Para situações mais complexas, é sugerida a utilização dessas últimas. Em suma, a implementação de interseções semaforizadas em áreas com fluxos elevados de veículos e pedestres não apenas otimiza a circulação, mas também contribui para a segurança viária. O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2015) reforça que políticas robustas de mobilidade são necessárias para enfrentar os desafios impostos

pelo aumento da frota veicular, sendo a semaforização uma solução eficaz para garantir maior fluidez e segurança no tráfego urbano.

Este estudo realiza um diagnóstico por meio de pesquisas de tráfego e propõe melhorias técnicas que poderão auxiliar na gestão do trânsito local e na tomada de decisões quanto ao disciplinamento da circulação de veículos e pedestres, além de sugerir aprimoramentos no sistema viário.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral:

- Este trabalho tem como objetivo analisar o funcionamento operacional da interseção semaforizada entre a Avenida José Bonifácio e a Travessa Antônio Baena da cidade de Belém, sob a ótica dos veículos motorizados.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Identificar problemas de tráfego na interseção.
- Propor soluções para otimizar o tráfego

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo se justifica pela necessidade de entender o funcionamento das interseções semaforizadas, especialmente em um contexto em que a mobilidade urbana desempenha uma função notável na otimização do tráfego. Embora os estudos sobre a otimização dessas interseções tenham avançado consideravelmente nas últimas décadas, ainda há questões pendentes, principalmente no que diz respeito ao congestionamento, que impacta diretamente o fluxo da cidade.

Entre as principais motivações para esta pesquisa, destaca-se a falta de propostas que possam contribuir para a obtenção de um ciclo semafórico mais adequado. A relevância do estudo é ampliada quando se considera a importância do planejamento e da gestão do tráfego para melhorar a fluidez e a segurança do sistema viário urbano.

Em resumo, a justificativa para este estudo está fundamentada na necessidade de resolver fluxos superiores ao grau de saturação da capacidade

das vias e filas de retenção, a partir de análises que considerem o uso do fator de equivalência, nesse caso a SEMOB, além da oportunidade de contribuir com soluções mais eficazes para a melhoria da funcionalidade das interseções

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além da presente introdução, no segundo capítulo, discorre-se sobre a importância da Engenharia e estudo do Tráfego, assim como volume de tráfego que é fundamental para o planejamento e gestão eficiente do sistema viário de uma cidade. Como ferramenta, os fatores de equivalência da SEMOB, que foram usados para realização de cálculos desta pesquisa. Com isso, foi contextualizado o planejamento de tráfego e tempo semaforizado.

No terceiro capítulo é apresentado o método de execução do trabalho, descrevendo as vias estudadas, procedimento da coleta de dados e por fim explicar como será feita a coleta de dados.

No quarto capítulo constam os resultados obtidos de cada etapa dos procedimentos de cálculo do capítulo 3. Onde mostrasse a contagem de veículos por aproximação e seus novos ciclos semaforicos e respectivas análises.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões a respeito da pesquisa.

2 CONSIDERAÇÕES TEORICAS

Neste capítulo, serão abordados os seguintes tópicos: Engenharia de estudo de tráfego; volume de tráfego; fatores de equivalência; planejamento de tráfego, tempo semaforico, fluxo de saturação, taxa de ocupação, ciclos semaforizados, grau de saturação, capacidade, espera média, nível de serviço e reprogramação semaforica.

2.1 SOBRE ENGENHARIA DE TRÁFEGO E ESTUDO DE TRÁFEGO

A Engenharia de Tráfego surgiu no início do século XX nos EUA, visando otimizar o fluxo de veículos e pedestres. Atualmente, é uma especialização da Engenharia Civil focada em melhorar a segurança viária, a capacidade de circulação e a eficácia do transporte público. Utiliza tecnologias e estratégias para reduzir congestionamentos, acidentes e promover uma mobilidade sustentável, integrando todos os modos de transporte. (PEREIRA,2023)

Por outro lado, o estudo de tráfego, segundo o DNIT (2006), analisa dados sobre motoristas, pedestres, veículos, vias e o ambiente para melhorar a mobilidade urbana. Utiliza metodologias como estimativas iniciais de demanda, modelos de viagens, análises de capacidade e atrasos do Highway Capacity Manual, além de ferramentas para otimizar semáforos e simulações em diferentes níveis de detalhamento (macroscópico, microscópico e mesoscópico) para soluções eficientes no tráfego urbano.

Dentro do estudo de tráfego temos as contagens volumétricas, que são essenciais para avaliar a demanda em interseções, fornecendo dados sobre o fluxo, os movimentos e a composição do tráfego. Segundo o DNIT (2006), podem ser globais, direcionais ou classificatórias, realizadas por observadores, sistemas automáticos, métodos manuais ou gravações em vídeo. As contagens direcionais e classificatórias classificam movimentos por direção e tipo de veículo, auxiliando na instalação de semáforos, análise de capacidade e segurança viária. O método por vídeo permite registrar simultaneamente os movimentos, reduzindo erros e otimizando a análise.

2.2 VOLUME DE TRÁFEGO

A estimação do volume de tráfego é importante para o planejamento e gestão do sistema viário, fornecendo dados essenciais para melhorar a mobilidade urbana e desenvolver estratégias de transporte. Estimativas como o Volume Diário Médio Anual (VDMA) são fundamentais para análises de segurança, como as Funções de Desempenho de Segurança Viária (FDSV) e estudos com o Método Empírico de Bayes (EB), considerando os volumes ao longo dos anos.

Segundo o Manual do DNIT, o volume de tráfego, expresso em veículos por hora ou por dia, é uma variável-chave para avaliar a fluidez e propor melhorias na via. Ele inclui:

- **Volume Médio Diário (VMD):** média de veículos em 24 horas, usado para planejar novas vias, melhorias e investimentos.

- **Volume Horário (VH):** tráfego total em uma hora, útil para identificar variações diárias no fluxo.

- **Composição do Tráfego:** diversidade de veículos em tamanho, peso e velocidade, essencial para projetar vias adequadas e estimar receitas.

Essas informações ajudam a determinar a capacidade e segurança da via, além de subsidiar decisões de investimento e políticas públicas.

2.2.1 VARIAÇÕES DOS VOLUMES DE TRÁFEGO

Os volumes de tráfego variam ao longo do dia, atingindo picos nos horários de maior movimento, onde ocorrem os eventos mais relevantes. Compreender essas variações é essencial para expandir contagens horárias para períodos diários com precisão, considerando os padrões de flutuação.

As horas de pico, com os maiores volumes diários, são relativamente estáveis em um mesmo local no mesmo dia da semana, embora os volumes variem ao longo da semana e do ano. Para determinar o Volume Horário de Projeto (VHP), é possível utilizar contagens semanais e dados de postos permanentes para estimar os volumes anuais.

Como o fluxo de veículos não é uniforme, a comparação de períodos consecutivos revela diferenças que levam ao cálculo do Fator Horário de Pico

(FHP), indicador da flutuação e uniformidade do tráfego. Conforme a equação abaixo.

$$FHP = \frac{V_{hp}}{4V_{15max}} \quad (01)$$

Em que:

FHP = fator horário de pico

V_{hp} = volume da hora de pico

V_{15max} = volume do período de quinze minutos com maior fluxo de tráfego dentro da hora de pico.

2.2.2 VOLUME DE TRÁFEGO EQUIVALENTE

Denomina-se volume de tráfego equivalente o volume de tráfego veicular expresso em termos de unidades de carros de passeio (ucp). Cada tipo de veículo apresenta um desempenho diferente no trânsito, enquanto veículos leves possuem mais praticidade e agilidade, os veículos pesados tendem a ser mais lentos e limitados em seu deslocamento. Desse modo, com intuito de fazer o levantamento de tráfego de maneira representativa incluindo todos os veículos que circulam na via, é necessário utilizar o fator de equivalência. (CONTRAN, 2014).

2.3 PLANEJAMENTO DE TRAFÉGO

O planejamento de tráfego é fundamental para garantir a fluidez e segurança das vias públicas, combinando princípios de engenharia, urbanismo, economia e ciências sociais para otimizar o fluxo de veículos, pedestres e ciclistas. Seu principal objetivo é melhorar a capacidade das vias, reduzindo congestionamentos e tempos de viagem, por meio de técnicas como o dimensionamento adequado de ruas, interseções eficientes, controle inteligente de semáforos e políticas de gerenciamento de demanda, como o incentivo ao transporte público, caronas e uso de bicicletas.

Além da eficiência, a segurança viária é uma prioridade, envolvendo a identificação e mitigação de pontos críticos, como interseções perigosas, com a

implementação de dispositivos de redução de velocidade e sinalização clara. Segundo Cypriano (2024), a tecnologia também é crucial, com sistemas de gerenciamento e sensores em tempo real, permitindo uma gestão mais eficaz, embora o sucesso dependa também do engajamento comunitário e da consideração das necessidades sociais e culturais nas soluções propostas.

2.4 TEMPO SEMAFORIZADO

Os sistemas de sinalização semafórica são baseados em ciclos e fases, que determinam os intervalos de tempo para o avanço ou interrupção dos fluxos de tráfego. O ciclo é a sequência completa de sinais, e a fase define o tempo em que determinados fluxos têm o direito de avançar. O tempo de transição, incluindo o tempo amarelo e o de limpeza, garante mudanças seguras entre as fases.

Existem dois tipos principais de temporização semafórica: o tempo fixo, onde os tempos são baseados em dados históricos de tráfego e os ciclos e fases permanecem constantes ao longo do dia, e o tempo atuado, o sistema opera em modo full drive, que ajusta o tempo verde em tempo real com base na demanda monitorada por detectores de tráfego, priorizando vias mais congestionadas (Teles, 2021).

2.4.1 TEMPO DE RESPOSTA

Existem essencialmente três tipos principais de estudos de tempo de resposta na literatura. O primeiro examina fatores que influenciam os tempos de resposta, como gênero do motorista, posição na fila e tipo de movimento. O segundo analisa os próprios tempos de resposta, avaliando a tendência central, dispersão e distribuição. O terceiro investiga o impacto desses tempos no desempenho do tráfego.

Em cruzamentos sinalizados, o tempo de resposta do veículo (tr_n) é o intervalo entre a saída do veículo anterior e sua própria saída. Para o primeiro veículo, o tempo de resposta inicial (tr_1) é o intervalo entre o sinal verde e o início do movimento. Tempos de resposta elevados reduzem o fluxo nos cruzamentos, enquanto tempos mais curtos e consistentes aumentam a mobilidade. Assim, é

essencial refletir esses tempos nos modelos de microsimulação de tráfego em interseções sinalizadas. (FONTES, 2020).

2.5 FLUXO DE SATURAÇÃO

O fluxo de saturação é definido como o número máximo de veículos que podem atravessar um ponto específico de uma faixa de tráfego em condições ideais durante um período de uma hora, quando o fluxo está saturado. Essa métrica é amplamente utilizada em estudos de engenharia de tráfego, pois auxilia na análise da capacidade de interseções e na determinação de tempos semafóricos.

De acordo com o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V: Sinalização Semafórica, publicado pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), o fluxo de saturação é considerado essencial para o cálculo de parâmetros operacionais em interseções semaforizadas. Ele serve como referência para avaliar o desempenho das vias e para propor melhorias na circulação de veículos, para interseções congestionadas a fórmula é expressa:

$$Hm = \frac{Hfs - H4}{fs - 4} \quad (02)$$

$$Fsat = \frac{3600}{Hm} \quad (03)$$

Em que:

Hm = headway médio para a faixa, no ciclo considerado (em segundos);

Fsat = é o fluxo de saturação (em veículos por hora de tempo verde);

fs = posição do último veículo da fila que passa sobre a linha de retenção.

Hfs = tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do último veículo proveniente da fila que passa sobre a linha de retenção (em segundos);

H4 = tempo transcorrido entre o início da indicação verde e a passagem das rodas traseiras do quarto veículo da fila (em segundos);

2.6 FATOR DE EQUIVALÊNCIA

O fator de equivalência veicular é uma ferramenta fundamental para comparar o impacto de veículos de passeio e de carga no tráfego, convertendo fluxos mistos em equivalentes homogêneos baseados em veículos de passeio, o que facilita análises de capacidade viária e nível de serviço. Segundo Maia (2022), essa conversão permite transformar o fluxo real em um fluxo fictício, padronizado por veículos de passeio, viabilizando avaliações mais precisas.

Os valores de equivalência podem ser observados na tabela 1 de acordo com a SEMOB (Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana de Belém), cada veículo possui um valor específico de equivalência, representando seu desempenho em relação ao veículo de passeio. Veículos não contemplados na tabela, como carretas e bicicletas, devem ser analisados em estudos separados, os quais não foram incluídos nesta pesquisa.

Tabela 1 - Fatores de Equivalência SEMOB

Tipo de Veículo	Fator de Equivalência
Automóvel	1
Motocicleta	0,75
Ônibus e Micro-ônibus	1,40
Caminhão leve	1,10
Caminhão pesado	1,50

Fonte: Decreto nº 12.661 (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2014).

2.7 TAXA DE OCUPAÇÃO

A ocupação das estradas é definida como a relação entre o volume de tráfego e o fluxo saturado. Esta medida indica o quanto a via é solicitada devido ao volume de tráfego e pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$Y = V_t / FS \quad (04)$$

Em que:

Y = Taxa de ocupação da via

V_t = Volume de tráfego da via (ucp/hora)

FS = Fluxo de saturação da via (ucp/hora)

Outra definição importante sobre esse tema é o conceito de taxa de ocupação crítica, que pode ser definida como sendo a maior taxa de ocupação de um estágio.

2.8 CICLOS SEMAFORIZADOS

Os ciclos semaforizados representam o funcionamento completo de um sistema de semáforos em uma interseção, compreendendo todas as fases de sinalização (verde, amarelo e vermelho) para cada aproximação ou direção de tráfego. Em resumo, um ciclo semafórico é o período necessário para que todos os movimentos na interseção tenham sua vez de fluir, garantindo organização, segurança e eficiência.

2.8.1 MÉTODO WEBSTER

O Método de Webster é uma abordagem amplamente utilizada na Engenharia de Tráfego para calcular o ciclo semafórico ótimo em interseções controladas por semáforos. Desenvolvido para minimizar atrasos e otimizar a fluidez, o método considera parâmetros como o fluxo veicular, grau de saturação e perdas de tempo no ciclo.

Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V: Sinalização Semafórica, publicado pelo CONTRAN (2014), o dimensionamento semafórico deve ser baseado em análises detalhadas do fluxo de tráfego, respeitando os parâmetros operacionais.

Serão calculados os tempos de ciclo mínimo, tempo de ciclo ótimo e os tempos de verde.

$$T_{c\acute{m}in} = \frac{Tp}{1-(Ya+Yb)} \quad (05)$$

$$C\acute{o}t = \frac{(1,5*Tp)+5}{1-(Ya+Yb)} \quad (06)$$

$$Tv,efet,i = \frac{(C\acute{o}t-Tp)*yi}{Ya+Yb} \quad (07)$$

Em que:

Tp = tempo perdido total, em segundos;

Ya = taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio 1.

Yb = taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio 2.

yi = taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i.

2.9 CAPACIDADE E GRAU DE SATURAÇÃO

A capacidade rodoviária refere-se ao número máximo de veículos que podem passar por uma determinada faixa ou segmento de estrada dentro de um tempo especificado e sob as condições existentes da estrada e do tráfego. Os cálculos são frequentemente utilizados para quantificar a adequação das estradas para acomodar os volumes de tráfego existentes e esperados, permitindo a análise técnica e económica de medidas para garantir que esses volumes de tráfego fluem em condições aceitáveis. (DENATRAN, 2006)

Portanto, a capacidade da estrada está diretamente relacionada ao seu fluxo de saturação. Seu valor pode ser obtido usando a seguinte fórmula:

$$Cap = FS * (Gef/C) \quad (08)$$

Em que:

Cap = Capacidade da via (ucp/hora)

FS = Fluxo de saturação da via (ucp/hora)

Gef = Tempo de verde efetivo do semáforo (segundos)

C = Tempo de ciclo do semáforo (segundos)

A saturação das estradas é definida como a relação entre o volume de tráfego e a capacidade de serviço. Segundo Lima (2005), seu valor indica a quão próxima a demanda está de sua capacidade nas condições reais de operação do cruzamento. Portanto, este fator é muito importante na avaliação do desempenho da estrada. A fórmula abaixo mostra como calcular o grau de saturação.

$$X = F/Cap \quad (09)$$

Em que:

X = Grau de saturação da via

Cap = Capacidade da via (ucp/hora)

F = Fluxo de veículos (ucp/hora)

Para valores de $X < 1$, conclui-se que a via opera com folga, sendo seu tempo de verde suficiente para o escoamento de todos os veículos. Para o valor de $X = 1$, entende-se que a via está operando em sua capacidade máxima, não sendo possível o atendimento de mais veículos. Já para $X > 1$, observa-se que a via opera acima do limite de sua capacidade, não sustentando flutuações e provocando congestionamentos e formação de fila. (LIMA, 2005)

2.10 ESPERA MÉDIA E NÍVEL DE SERVIÇO

A espera média (E_m) é um indicador essencial na análise de interseções semaforizadas, representando o tempo médio que um veículo permanece parado no sinal vermelho antes de prosseguir. Segundo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V: Sinalização Semafórica do CONTRAN (2014), a espera média é utilizada para avaliar o desempenho operacional e o nível de serviço (LOS) das interseções, auxiliando na identificação de atrasos e na proposta de melhorias.

$$E_m = 0,5C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2 / \left(1 - \left(\frac{g}{C}\right) * \left(\frac{v}{FSat}\right)\right) \quad (10)$$

Em que:

E_m = Tempo médio de espera (segundos)

v = Fluxo da aproximação (ucp/segundo)

FS = Fluxo de saturação da via (ucp/segundo)

C = Tempo de ciclo do semáforo (segundos)

g = Verde efetivo do semáforo (segundos)

O Nível de Serviço (NS) é uma métrica amplamente utilizada na Engenharia de Tráfego para avaliar a qualidade operacional de uma via ou interseção. De acordo com o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V: Sinalização Semafórica, publicado pelo CONTRAN (2014), o nível de

serviço é determinado com base no tempo médio de espera (Em). Sendo determinado, pela tabela 02.

Tabela 2 – Classificação dos Níveis de Serviço

NS	Espera no semáforo (s/veículo)
A	0 a 10
B	10 a 20
C	20 a 35
D	35 a 55
E	55 a 80
F	Maior que 80

Fonte: HCM,2010, adaptada

O CONTRAN recomenda que interseções semaforizadas sejam projetadas para garantir um nível de serviço aceitável, geralmente entre C e D, equilibrando eficiência e segurança. Níveis superiores indicam a necessidade de ajustes, como reprogramação semafórica ou ampliação da capacidade viária.

2.11 REPROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA (semáforo muda de acordo com o horário de pico)

O aumento da frota e a complexidade do tráfego urbano exigem estratégias eficazes, como a reprogramação semafórica, que ajusta os tempos dos semáforos de acordo com demandas reais. Esse processo visa otimizar o tráfego, reduzir congestionamentos e o tempo de espera, além de aumentar a segurança e reduzir emissões. Com o suporte de avanços matemáticos e computacionais, novas abordagens têm sido exploradas para lidar com a variabilidade do tráfego (LIMA, 2022).

De acordo com Oliveira (2020), os principais objetivos da reprogramação semafórica são:

- Melhorar o fluxo de tráfego: Ajustes nos tempos dos semáforos para evitar congestionamentos.
- Reduzir o tempo de espera: Proporciona uma experiência mais fluida para motoristas e pedestres.

- Aumentar a segurança: Ajustes dinâmicos reduzem o risco de acidentes.
- Diminuir emissões de poluentes: Menor tempo de espera e fluxo otimizado reduzem emissões.

Há três principais abordagens para a reprogramação semafórica (LIMA, 2019):

1. **Sistemas de Reprogramação Estática:** Ajustes manuais em horários predefinidos, como horários de pico.
2. **Sistemas de Reprogramação Dinâmica:** Ajustes automáticos em tempo real baseados no fluxo monitorado por sensores.
3. **Sistemas de Controle de Tráfego por Redes:** Integra comunicação V2I, permitindo a interação entre veículos e semáforos para ajustes em toda a rede.

As tecnologias que suportam esses sistemas incluem:

- **Sensores de Tráfego:** Monitoram o fluxo em tempo real, viabilizando ajustes precisos.
- **Sistemas de Controle Centralizado:** Software que processa dados e ajusta os tempos dos semáforos em tempo real.
- **IA e Machine Learning:** Aprendem padrões de tráfego, otimizando a programação.
- **Comunicação V2I:** Permite ajustes com base no movimento dos veículos.

Um dos métodos utilizados na reprogramação semafórica é a "**Reprogramação de Semáforos com Base na Observação de Campo**", que visa quantificar a ociosidade ou congestionamento das aproximações de um semáforo, a fim de promover ajustes. As aproximações (chegadas) dos veículos em um semáforo podem ser classificadas em duas situações possíveis: **congestionadas**, quando há filas ao final do ciclo verde, ou **ociosas**, quando há tempo de verde excedente ao término da fila. (CET)

Para esse processo, adotam-se os seguintes parâmetros para o fluxo de tráfego:

- Espaço ocupado por cada veículo parado na fila: **6 m/veículo/faixa**
- Intervalo entre veículos em situação de saturação: **será usado de acordo com o Hm da aproximação em s/veículo/faixa.**

$$\text{Fila normal} = tv \cdot 6 / Hm \quad (11)$$

Em que:

tv = tempo de verde da aproximação considerada

$$\text{Tempo verde adicional na hora} = (\text{Fila máxima} - \text{Fila normal}) \times \frac{Hm}{6} \quad (12)$$

$$\text{tv adicional} = \text{tempo verde adicional por ciclo} = (\text{tempo verde adicional na hora}) \div (3600 / tc) \quad (13)$$

Em que:

tc = tempo de ciclo (tempo de duração de cada ciclo semafórico)

$$\bullet \quad \text{tv mínimo} = tv + tv \text{ adicional} \quad (14)$$

A reprogramação semafórica é, portanto, uma ferramenta poderosa para melhorar a mobilidade urbana e otimizar o fluxo de tráfego. A integração de tecnologias avançadas, como sensores, inteligência artificial e comunicação veículo-infraestrutura, tem o potencial de transformar a gestão do trânsito nas cidades, tornando-a mais eficiente, segura e sustentável. No entanto, a implementação desses sistemas exige investimentos significativos em infraestrutura e tecnologia, além de uma análise contínua dos dados para assegurar a eficácia das soluções adotadas.

2.12 CICLOS PARA NOVOS TEMPOS DE VERDE PARA REPROGRAMAÇÃO DE SEMÁFOROS.

Estudos mostram a possibilidade de calcular o tempo exato de verde para cada aproximação, eliminando excessos (tv oc) ou adicionando o tempo necessário (tv adic). Os tempos de verde obtidos dessa forma representam os tempos mínimos (tv min) para as respectivas aproximações. O tempo mínimo de verde necessário para uma aproximação durante uma hora é calculado multiplicando-se o tv min (no ciclo) pelo número de ciclos ocorridos ao longo da hora.

$$N^{\circ} \text{ de ciclos na hora} = 3600s / tc \quad (15)$$

$$\text{tempo de verde mínimo na hora} = tv \text{ min} \times 3600s / tc \quad (16)$$

Em que:

t_c = Tempo de ciclo existente

$t_{v \min}$ = Tempo de verde mínimo (no ciclo) da aproximação

$t_{v \min/h}$ = Tempo de verde mínimo da aproximação, na hora

$$\text{Perda horária máxima} = 3600 - \sum t_{v \min/h}. \quad (17)$$

Quanto maior for a soma dos tempos de verde mínimos, maior será a saturação do cruzamento. Caso a soma dos tempos de verde mínimos seja igual ou superior a 3600 segundos, o cruzamento estará congestionado, independentemente da programação adotada. Sabendo que o tempo perdido em cada ciclo do semáforo (t_p) é calculado pela soma dos tempos de amarelo, além dos tempos destinados aos pedestres e às operações de limpeza/segurança, é possível determinar o "Número Máximo de Ciclos por Hora", dividindo-se a perda horária máxima pelo tempo perdido por ciclo (t_p).

$$N^{\circ} \text{ Máximo de Ciclos na Hora} = \text{perda horária máxima} / t_p \quad (18)$$

Em que:

t_p = Tempo perdido no Ciclo (tempo sem movimento veicular)

Tendo-se o número máximo de ciclos na hora, basta dividir os 3600s da hora por este número, para

obtermos o tempo de ciclo mínimo (**$t_{v \min}$**) do semáforo.

$$T_{c \min} = \frac{3600}{\text{número máximo de ciclos na hora}} \quad (19)$$

É importante trabalhar sempre com tempos de ciclo maiores que os mínimos, aplicando o coeficiente de 1,5 de WEBSTER para se obter o **ciclo ótimo**.

Para se evitar ciclos excessivamente longos, bem como para facilitar a coordenação de semáforos, pode-se operar com tempos de ciclos variando, ainda de acordo com WEBSTER, de 0,75 até 1,5 do tempo de ciclo ótimo.

$$0,75 \text{ tc oc} < \text{tc} < 1,5 \text{ tc oc} \quad (20)$$

Em que:

tc = tempo de ciclo a escolher

tc oc = tempo de ciclo ótimo

Obtido o tempo de ciclo, os tempos de verde são calculados proporcionalmente aos tempos mínimos de verde necessários, por meio da seguinte fórmula:

$$T_{vi} = \frac{tv_{min\ i/h}}{\sum tv_{min/h}} \times (tc - tp) \quad (21)$$

Em que:

tvi = tempo de verde de aproximação “i”

tv min = tempo de verde mínimo de aproximação “i” na hora

i/h

Σ tv min

i/h = somatória dos tempos de verde mínimos na hora de todas as aproximações

tc = tempo de ciclo

tp = tempo perdido no ciclo (tempo sem movimento veicular)

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi estruturada em diversas etapas para garantir uma análise detalhada da interseção semaforizada selecionada. Inicialmente, foi realizada a escolha do local de estudo, seguida pela identificação e classificação dos fluxos de tráfego existentes, considerando os movimentos possíveis na área. Em seguida, foi definido o período de pico de tráfego, momento em que as condições mais críticas do fluxo veicular foram avaliadas. O ciclo semafórico atual foi verificado. Para determinar melhorias no sistema, foram calculados novos ciclos semafóricos utilizando o método de Webster e o método do CET, o que incluiu a avaliação de parâmetros como taxa de ocupação, grau de saturação, tempo médio de espera e nível de serviço. Por fim, os resultados foram analisados de forma específica para cada movimento e de forma global, permitindo uma avaliação ampla do desempenho da interseção estudada.

3.1 ESCOLHA DA INTERSEÇÃO SEMAFORIZADA

A interseção escolhida foi a da avenida José Bonifácio e Antônio Baena, pois dá acesso ao centro da cidade de Belém, -PA.

O trecho analisado está situado na Travessa Antônio Baena e tem início na Travessa Antônio Barreto, estendendo-se até a Avenida José Bonifácio. É classificada como uma via coletora, a Travessa Antônio Baena desempenha a função de captar o tráfego de vias locais e distribuí-lo para vias arteriais, além de conectar áreas residenciais e comerciais.

A Avenida José Bonifácio e tem início na Avenida Duque de Caxias, a hierarquia da via é classificada como uma via arterial devido à sua importância para a conexão entre áreas centrais e periféricas de Belém, além de sua integração com outras vias arteriais e principais da cidade.

3.1.1 AVENIDA ANTÔNIO BAENA

Figura 1 - Avenida Antônio Baena



Fonte: Fotos obtidas in loco pelos autores (2024).

Os movimentos de tráfego permitidos são seguir em frente pela via Antônio Barreto ou realizar a conversão à direita em direção à Avenida Duque de Caxias.

Quanto à sinalização, a via apresenta, na horizontal, setas de orientação, faixa de pedestre, delimitação da ciclofaixa e área de espera para motos; e, na vertical, placas de identificação das vias e indicação da área de espera para motos.

3.1.2 AVENIDA JOSÉ BONIFÁCIO

Figura 2 - Avenida José Bonifácio



Fonte: Foto retirada in loco pelos autores (2024).

A avenida conta com três faixas de rolamento, cada uma com 3,5 metros de largura, e uma ciclofaixa de mão dupla com 2,4 metros de largura. Neste estudo, a contagem de bicicletas foi desconsiderada devido à presença da ciclofaixa e a análise ser voltada ao fluxo veicular apenas. O fluxo de tráfego na área permite dois movimentos principais: seguir em frente pela Avenida Duque de Caxias ou realizar a conversão à esquerda para a Travessa Antônio Barreto.

Em relação à sinalização, a via apresenta, na horizontal, setas de orientação, faixa de pedestre, delimitação da ciclofaixa e área de espera para motos; e, na vertical, placas indicando a área de espera para motos e a identificação das vias.

3.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

Para a coleta das informações, a equipe foi organizada de forma a otimizar a execução da contagem de veículos, com uma pessoa designada para registrar cada movimento específico. A equipe posicionou-se na lateral da pista no dia 1º de junho de 2023, e o período de contagem teve duração de duas horas.

A contagem foi registrada em intervalos de 15 minutos; ao término de cada período, a contagem era encerrada e uma nova contagem era iniciada. A atividade teve início às 11h e foi concluída às 13h. A escolha desse intervalo temporal foi fundamentada no fato de ser um período de tráfego mais intenso na região, além de coincidir com um dia útil, quinta-feira, o que contribuiu para a expectativa de um volume elevado de circulação de veículos.

3.2.2 HORA DE PICO

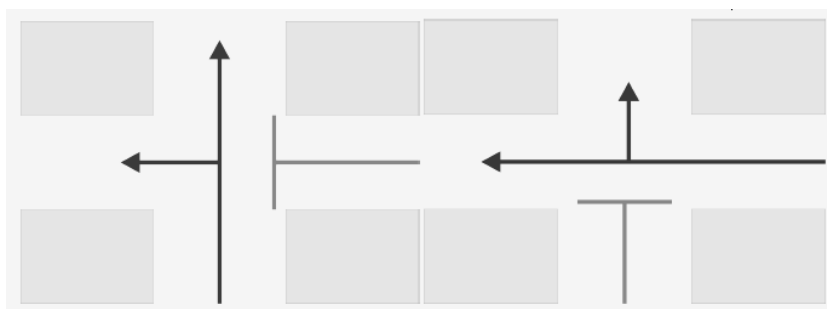
Para determinar a hora de pico, foi realizada a soma dos fluxos de cada movimento na interseção, considerando os valores de equivalência específicos para cada tipo de veículo. Esses valores foram aplicados para calcular o fluxo equivalente de cada veículo, que foi somado em intervalos de 15 minutos ao longo do período de análise, compreendido entre 11h e 13h. Com base nesses cálculos, identificou-se o intervalo de 15 minutos com o maior fluxo, o qual foi definido como a hora de pico. Posteriormente, foi determinado o fluxo acumulado

por hora, considerando o somatório dos fluxos de cada movimento registrado durante o período de maior intensidade.

3.2.3 CICLO SEMAFÓRICO

Foi conferido em campo os tempos do ciclo semafórico atual e os estágios existentes, obtendo os seguintes dados:

Figura 3 - Diagramas de estágios da aproximação 1 e 2 respectivamente



Fonte: Autores (2024).

O diagrama de estágio mostra a aproximação 1 que vai da José Bonifácio para Duque de Caxias com conversão à esquerda para Antônio Barreto e com o sinal vermelho fechado para a avenida Antônio Baena, já na aproximação 2 que vai da avenida Antônio Baena para a Antônio Barreto com conversão à direita para avenida Duque de Caxias e com o sinal vermelho fechado para avenida Jose Bonifácio.

Tabela 3 - Ciclo Semafórico Existente.

JOSÉ BONIFÁCIO – DUQUE DE CAXIAS

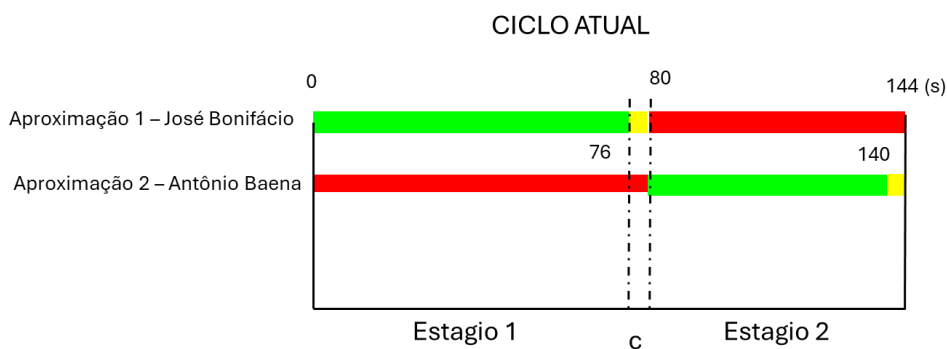
Tempo de Verde (segundos)	76
Tempo de Amarelo (segundos)	4
Tempo de Vermelho (segundos)	64
Tempo de Ciclo (segundos)	144

ANTÔNIO BAENA – ANTÔNIO BARRETO

Tempo de Verde (segundos)	60
Tempo de Amarelo (segundos)	4
Tempo de Vermelho (segundos)	80
Tempo de Ciclo (segundos)	144

Fonte: Autores (2024).

Gráfico 1- ciclo atual das duas aproximações.



Fonte: Autores (2024).

3.2.4 FLUXO DE SATURAÇÃO

Para o cálculo do Fluxo de Saturação, foi utilizado a fórmula do Intervalo de Saturação (H_m), no qual foi obtido o tempo do quarto carro que passou após o sinal verde (H_4), o tempo do último carro que passou durante o sinal verde (H_{fs}), e o número da quantidade de filas que passaram nesse tempo de verde (f_s), e depois foi utilizado a fórmula que relaciona o fluxo de saturação com o Intervalo de saturação. Os dados foram coletados in loco, importante ressaltar que esses dados foram para cada faixa de rolamento.

Tabela 4: Dados obtidos in loco para auxiliar os cálculos.

Aproximação 1 – José Bonifácio			
	H_{fs} (segundos)	H₄ (segundos)	f_s
FAIXA 01	76	8	31
FAIXA 02	74,5	7,5	35
FAIXA 03	75,5	7,5	28
Aproximação 2 – Antônio Baena			
	H_{fs} (segundos)	H₄ (segundos)	f_s
FAIXA 01	59	15	21
FAIXA 02	58,5	14,5	17

Fonte: Autores (2024).

3.2.5 APROXIMAÇÃO CONGESTIONADA

Para o cálculo da aproximação congestionada foi necessário a contagem do número de veículos que ficaram ainda após o sinal fechar para ser obtido o tamanho da fila de congestionamento.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Com base nas informações coletadas, foram elaboradas tabelas no aplicativo Excel, agrupando as quantidades de veículos e classificando-os conforme o tipo. Para a análise dos dados e realização dos cálculos subsequentes, utilizou-se o Fator de Equivalência da SEMOB, o qual foi empregado ao longo de todo o processo. Durante o desenvolvimento das fórmulas, foi realizada a comparação entre os valores obtidos dos diferentes tipos de métodos aplicados e os valores já existentes, a fim de analisar os resultados.

4 RESULTADOS GERAIS DA PESQUISA E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 CONTAGEM DOS VEÍCULOS

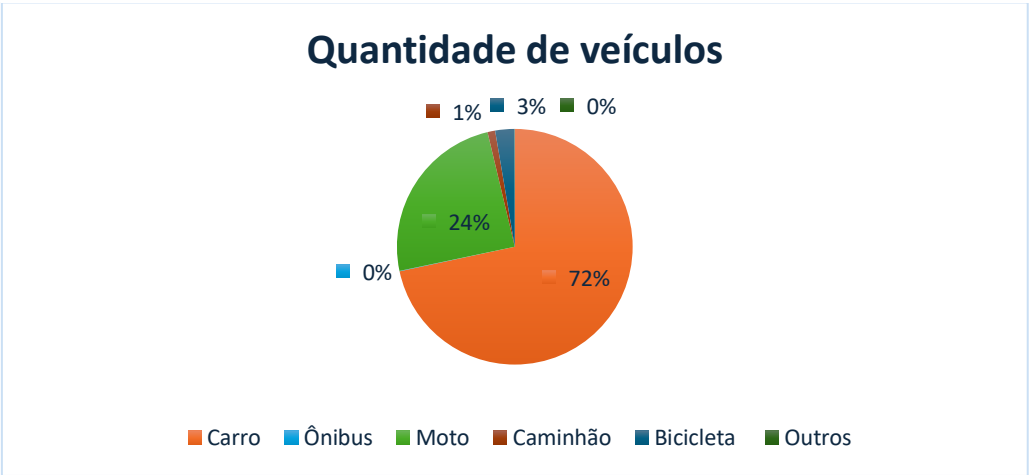
Na avenida José Bonifácio verificou-se que aproximadamente 72% do fluxo de veículos é composto por carros de passeio e 25% por motocicletas, estes valores são aproximados para a maioria das interseções na região metropolitana de Belém. No gráfico 1 é possível observar os veículos contabilizados na aproximação e a tabela 5 mostra o quantitativo.

Tabela 5 - Veículos contabilizados na aproximação 1.

Aproximação 1 - José Bonifácio								
Período			Quantidade de veículos					
			Carro	Ônibus	Moto	Caminhão	Bicicleta	Outros
1	11:00:00	11:15:00	485	1	169	6	10	
2	11:15:00	11:30:00	477	0	183	13	23	1
3	11:30:00	11:45:00	495	0	174	5	23	
4	11:45:00	12:00:00	388	1	177	5	29	1
5	12:00:00	12:15:00	438	0	163	10	15	
6	12:15:00	12:30:00	515	0	127	6	14	
7	12:30:00	12:45:00	470	0	145	5	14	
8	12:45:00	13:00:00	430	1	130	4	8	
TOTAL			3698	3	1268	54	136	2

Fonte: Autores (2023).

Gráfico 2 - Representação gráfica dos veículos contabilizados na aproximação 1.



Fonte: Autores (2024).

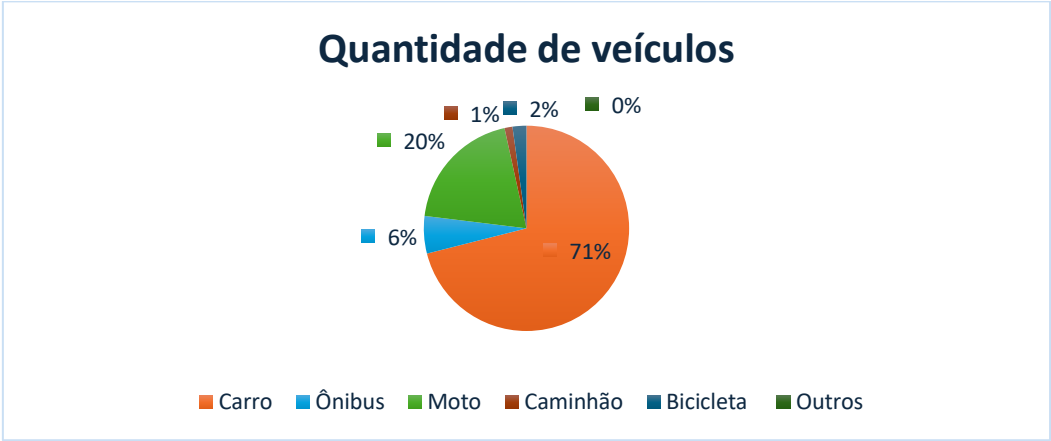
Na avenida Antônio Baena foi observado que aproximadamente 73% do fluxo de veículos é composto por carros de passeio e 14% por motocicletas e 8% por ônibus, o número de carros de passeio é condizente com a maioria das interseções na região metropolitana, o fluxo expressivo de ônibus se dá por fazer parte de diversas linhas de ônibus. No gráfico 2 é possível observar os veículos contabilizados na aproximação e a tabela 6 mostra o quantitativo.

Tabela 6 - Veículos contabilizados na aproximação 2

Aproximação 2 - Antônio Baena								
Período			Quantidade de veículos					
			Carro	Ônibus	Moto	Caminhão	Bicicleta	Outros
1	11:00:00	11:15:00	204	22	40	7	7	0
2	11:15:00	11:30:00	172	17	37	5	4	0
3	11:30:00	11:45:00	181	20	55	4	5	0
4	11:45:00	12:00:00	213	15	70	3	5	0
5	12:00:00	12:15:00	204	13	46	4	12	0
6	12:15:00	12:30:00	182	18	46	1	7	0
7	12:30:00	12:45:00	190	7	48	2	3	0
8	12:45:00	13:00:00	185	15	81	1	4	0
TOTAL			1531	127	423	27	47	0

Fonte: Autores (2023).

Gráfico 3 - Representação gráfica dos veículos contabilizado na aproximação 2.



Fonte: Autores (2024).

4.2 HORA DE PICO

A tabela apresentada a seguir mostra o fluxo nos 15 minutos de pico e o fluxo acumulado na hora de pico, respectivamente. Esses resultados permitem uma análise mais detalhada da situação de tráfego na interseção e contribuem

para a identificação de oportunidades de melhoria para a gestão do tráfego na região.

Tabela 7- Somatória dos fluxos por aproximação considerando o fator de equivalência da SEMOB.

	Período		Aproximação 1	Aproximação 2	Total	Acumulado
1	11:00:00	11:15:00	623,65	276,7	900,35	
2	11:15:00	11:30:00	635,15	232,45	867,6	
3	11:30:00	11:45:00	634,5	256,25	890,75	
4	11:45:00	12:00:00	535,45	291	826,45	3.485,15
5	12:00:00	12:15:00	579,55	264,1	843,65	3.428,45
6	12:15:00	12:30:00	627,75	244,6	872,35	3.433,20
7	12:30:00	12:45:00	587,65	240,2	827,85	3.370,30
8	12:45:00	13:00:00	542	271,05	813,05	3.356,90

Fonte: Autores (2023).

A hora de pico identificada nesse trabalho foi no período das 11h ao 12h. Após isso, foi realizado o Cálculo do Fator Hora de Pico utilizando a fórmula 01 conforme seção 2.2.1 do referencial teórico.

Tabela 8- Cálculo do Fator de Hora de Pico considerando o fator de equivalência da SEMOB

HORA DE PICO	
Volume HP	3.485,15
Volume 15 min	900,35
FHP	0,97

Fonte: Autores (2023).

4.3 DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS

A partir dos dados coletados foi iniciado o tratamento de dados aplicando os fatores de equivalência para ser obtido os fluxos da interseção de acordo com os quatro movimentos possíveis para as duas aproximações estudadas. Como citado anteriormente, foi utilizado o Fator de Equivalência da SEMOB cujo foi exposto na tabela 01.

Tabela 9: Fluxos determinados utilizando Fator de Equivalência da SEMOB

	Aproximação 1	Aproximação 2
Fluxo	2419,950	1048,800

Fonte: Autores (2024).

4.4 FLUXO DE SATURAÇÃO

Para o cálculo do fluxo de saturação foram utilizadas as fórmulas do tópico 2.5 das considerações teóricas.

Assim, Hm e Fsat para a aproximação 1:

Tabela 10: Cálculo do Hm e Fsat por faixa para a aproximação 1.

Hm (segundos)	2,519	2,161	2,833
Fluxo de saturação (veículos/hora)	1429,412	1665,672	1270,588

Fonte: Autores (2024).

Logo, Hm para a aproximação 1, será a média entre esses resultados.

$$\text{Hm (aprox1)} = 2,504 \text{ s}$$

Somando os três valores encontrados, será obtido o fluxo de saturação total da aproximação 1.

$$\text{Fsat} = 1429,412 + 1665,67 + 1270,59 = \mathbf{4365,672 \text{ veículos/h}}$$

Enquanto para a aproximação 2, será:

Tabela 11: Cálculo do Hm e Fsat por faixa para a aproximação 2.

Hm (segundos)	2,588	3,385
Fluxo de saturação (veículos/hora)	1390,909	1063,636

Fonte: Autores (2024).

Logo, Hm para a aproximação 2, será a média entre esses resultados.

$$\text{Hm (aprox2)} = 2,986 \text{ s}$$

Somando os dois valores encontrados, será obtido o fluxo de saturação total da aproximação 2.

$$\text{Fluxo de saturação} = 1390,91 + 1063,64 = \mathbf{2454,545 \text{ veículos/h}}$$

4.5 TAXA DE OCUPAÇÃO

Após os cálculos anteriores de fluxo e fluxo de saturação foi possível calcular a taxa de ocupação para cada aproximação pela fórmula (04) do tópico 2.7 das considerações teóricas. Sendo (ΣY), a soma das taxas de ocupação da aproximação 1 e da aproximação 2.

Tabela 12: Resultado dos cálculos das taxas de ocupação.

Y (APROXIMAÇÃO 1)	0,55
Y (APROXIMAÇÃO 2)	0,43
ΣY	0,98

Fonte: Autores (2024).

Os valores encontrados estão acima de 80%, o que caracteriza que a interseção tem um tráfego muito intenso. Vale ressaltar, ainda que a soma das taxas de ocupação não pode ser maior do que 1.

4.6 CICLO SEMAFÓRICO

Considerando que a velocidade máxima permitida nas vias estudadas é de 50 km/h, o tempo perdido para a interseção é de 8 segundos, 4 segundos para cada tempo de amarelo. A partir disso pode ser calculado o tempo de ciclo mínimo, o ciclo ótimo e o tempo de verde para cada aproximação.

A partir das taxas de ocupação de cada via e o tempo perdido do ciclo, é possível realizar os cálculos, conforme descrito na seção 2.9. das considerações teóricas, utilizando as fórmulas 05, 06 e 07 os cálculos completos do ciclo semafórico podem ser encontrados no Apêndice A.

Tabela 13 - Ciclos Semafóricos calculados.

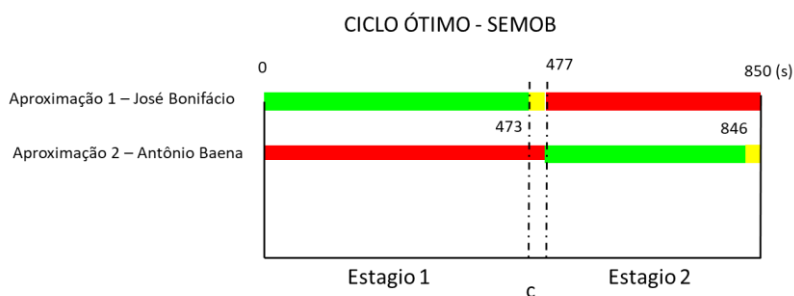
Tempo perdido	8 segundos
Tempo Mínimo	400 segundos
Tempo de Ciclo Ótimo	850 segundos
TVa1	473 segundos
TVa2	369 segundos

Fonte: Autores (2024).

4.6.1 CICLO ÓTIMO

O gráfico a seguir mostra o ciclo obtido através dos cálculos anteriores por meio do fator de equivalência da SEMOB.

Gráfico 4- Ciclo ótimo de acordo com a SEMOB.



Fonte: Autores (2024).

Um ciclo semafórico com 850 segundos é inviável devido ao tempo de espera excessivo, redução da capacidade da interseção e riscos de acidentes causando problemas de congestionamento e segurança, além de frustração e estresse para os motoristas.

4.7 CAPACIDADE E GRAU DE SATURAÇÃO

Apesar do ciclo ter um valor muito elevado e inviável, será calculado com o fluxo de saturação, tempo de verde efetivo para cada aproximação e o tempo

de ciclo ótimo, a capacidade através da fórmula (11) do tópico 2.11 das considerações teóricas. Assim, foram obtidos os resultados abaixo.

Capacidade para aproximação 1 = 2427,062 veículos/h

Capacidade para aproximação 2 = 1066,858 veículos/h

Para o cálculo do grau de saturação foi utilizada a fórmula (12) do mesmo tópico. Obtendo os seguintes valores.

Grau de saturação para aproximação 1 = 0,99

Grau de saturação para aproximação 2 = 0,98

Esses resultados estão muito próximos de um, ou seja, do limite da capacidade da via, o que pode afetar negativamente a fluidez do tráfego. A análise sugere a necessidade de planejamento e implementação de medidas para aumentar a capacidade ou otimizar o fluxo de tráfego, a fim de evitar congestionamentos severos e melhorar o nível de serviço da área.

4.8 ESPERA MÉDIA E NÍVEL DE SERVIÇO

Com os dados do ciclo atual da interseção (tempo de verde e o tempo total do ciclo) e os fluxos e fluxos de saturação de cada aproximação, foi possível calcular o tempo de espera média de cada uma. E a partir desse tempo de espera determinar o atual nível de serviço de cada aproximação. A fórmula utilizada é a (10) do tópico 2.10 das considerações teóricas. A espera média foi calculada para cada uma das aproximações. Assim, foram obtidos os seguintes valores.

$$E.m.1 = \frac{1}{2} \cdot 850 \cdot \frac{(1 - 400/850)^2}{1 - \left(\frac{400}{850}\right) \cdot (2419,950/4365,672)} = 120,72 \text{ s}$$

$$E.m.2 = \frac{1}{2} \cdot 850 \cdot \frac{(1 - 369/850)^2}{1 - \left(\frac{369}{850}\right) \cdot (1048,800/2454,545)} = 167,06 \text{ s}$$

Sendo assim, o nível de serviço será F, pois são maiores do que 80 segundos.

Um Nível de Serviço F representa o pior cenário, onde o volume de tráfego excede a capacidade da interseção, levando a atrasos significativos e congestionamentos frequentes. Nesse caso, uma espera média superior a 80 segundos por veículo é um indicador de que a interseção não está atendendo de maneira eficiente a demanda de tráfego.

4.9 APROXIMAÇÃO CONGESTIONADA

Como citado no referencial teórico, processo de reprogramação semafórica envolve a análise e o ajuste dos tempos dos sinais semafóricos com o objetivo de otimizar o tráfego, reduzir congestionamentos e minimizar o tempo de espera tanto dos motoristas quanto dos pedestres. Conforme o tópico 2.11 das considerações teóricas foram utilizadas as fórmulas 11 a 14 para a obtenção resultados contidos na tabela 14, cálculos detalhados encontrados no Apêndice B.

Tabela 14: Resultados dos cálculos para encontrar os tempos de verde mínimos.

	José Bonifácio	Antônio Baena
Fila máxima (m)	200,1	132,5
Fila normal (m)	182,1	120,5
Fila congestionada (m)	18	12
Tempo de verde adicional na hora (s/h)	7,5	6
Números de ciclos na hora (ciclos/h)	25	
Tempo verde adicional por ciclo (segundos)	0,3	0,2
Tv mínimo (segundos)	76,3	60,2

Fonte: Autores (2024).

4.10 CÁLCULO DOS NOVOS TEMPOS DE CICLO DE VERDE

Dando prosseguimento aos cálculos para encontrar possíveis valores atribuídos ao novo ciclo, foram utilizadas as fórmulas 15 a 21 contidas no tópico

2.12 das considerações teóricas, os cálculos completos do ciclo semaforico podem ser encontrados no Apêndice B.

Tabela 15: Resultados dos cálculos para encontrar os novos tempos de ciclo.

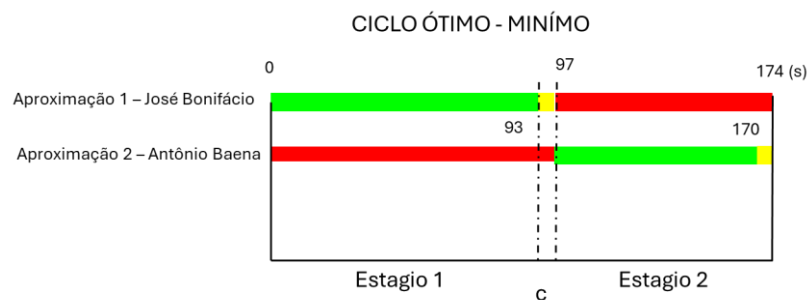
	José Bonifácio	Antônio Baena
Tempo verde mínimo na hora (s/h)	1907,5	1506
Perda horária máxima (s/h)	187	
Número máximo de ciclos na hora (ciclos/h)	23	
Tc mínimo (segundos)	154	
Tc ótimo (segundos)	231	
Tc ótimo mínimo (segundos)	174	
Tc ótimo máximo (segundos)	347	
Tv mínimo (segundos)	93	73
Tv máximo(segundos)	188	149

Fonte: Autores (2024).

A perda máxima horária não deve ser negativa, pois significaria que seriam necessários mais do que 3600 segundos para as aproximações operarem sem congestionamento, se for negativo o cruzamento estará saturado ou congestionado, e nenhuma programação resolverá o problema sem causar filas.

A diferença entre o ciclo atual de 144 segundos e os valores calculados de 154 segundos e 174 segundos evidencia a necessidade de ajustes para otimizar a operação da interseção, sendo que o ciclo ótimo mínimo de 174 segundos oferece uma solução mais eficaz, proporcionando tempos de verde suficientes para evitar congestionamentos e filas de retenção, garantindo maior fluidez ao tráfego.

Gráfico 5 – Novo Ciclo ótimo para a interseção



Fonte: Autores (2024).

4.11 CÁLCULO DAS NOVAS CAPACIDADES E GRAU DE SATURAÇÃO

Considerando o tempo de ciclo ótimo de 174 segundos e as fórmulas contidas no tópico 2.11, serão obtidos os valores.

Capacidade para aproximação 1 = 2327,26 veículos/h

Capacidade para aproximação 2 = 1033,03 veículos/h

Para o cálculo do grau de saturação foi utilizada a fórmula (12) do mesmo tópico 2.11.

Grau de saturação para aproximação 1 = 1,04

Grau de saturação para aproximação 2 = 1,02

Embora os graus de saturação indiquem valores acima de 1, o ciclo ótimo de 174 segundos foi mantido como uma solução intermediária, ele não eliminaria completamente o problema de saturação, mas pretende melhorar a fluidez e a redução de filas em relação à configuração atual, sendo assim, será a melhor opção dentro das condições presentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, percebe-se que o grau de saturação das duas aproximações que compõem a interseção apresenta valores superiores a 1, ou muito próximos desse limite, indicando a ausência de reserva de capacidade nas vias para atender à demanda veicular existente. Além disso, o ciclo semaforico atual, com duração de 144 segundos, mostrou-se inadequado, resultando em filas de retenção de demanda após o término dos tempos de verde em ambas as aproximações.

A aplicação de um novo cálculo semaforico, considerando as condições operacionais atuais da interseção e utilizando o método de Webster, revelou-se inviável, pois os ciclos gerados apresentaram valores excessivamente elevados, chegando a 850 segundos, o que poderia comprometer o funcionamento das interseções adjacentes. Em contrapartida, o método de campo do CET mostrou-se eficaz e prático para a redefinição do ciclo semaforico da interseção, fornecendo valores viáveis que condizem com a realidade local, sendo o ciclo de 174 segundos o mais adequado.

O novo ciclo semaforico proporcionará tempo suficiente para evitar a retenção de demanda nas aproximações após o término dos respectivos tempos de verde, sem, contudo, alterar significativamente a concentração de veículos nas vias que compõem a interseção. Recomenda-se, no entanto, testar o ciclo mínimo de 154 segundos, também obtido pelo método do CET, para evitar períodos de sinal verde ociosos e melhorar a eficiência operacional.

Além disso, sugere-se ao poder público revisar o planejamento do sistema viário, levando em consideração as características físicas e operacionais da infraestrutura, como o número de faixas, a presença de ciclofaixas e estacionamentos. Avaliar a possibilidade de realocar esses elementos pode contribuir para reduzir a sobrecarga atual na interseção e melhorar a fluidez do tráfego.

REFERÊNCIAS

BEYER, Maicon A. Estudo de viabilidade técnica para Implantação semafórica no município de Campo Mourão. 2016. 98 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

CAVALCANTE, Walter de Lima. Estudo de tráfego para melhoria da mobilidade urbana no município de Morada Nova-CE. 2021.

CONTRAN. Volume V – Sinalização Semafórica. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. DENATRAN, Ministério das Cidades, 2014.

CYPRIANO, Lídia Teixeira. Análise de interseções rodoviárias a partir de microsimulação de tráfego. 2024. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

DER-SP. Manual de segurança viária. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, 2023.

DNIT. Manual de Estudos de Tráfego. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, p. 384. 2006.

FONTES, Diego Barbosa; ARAÚJO, Alessandro Macêdo de; CASTRO NETO, Manoel Mendonça de. Implementação de um modelo probabilístico do tempo de resposta em interseções semaforizadas no VISSIM. 2020.

GONTIJO, Grasielle Martins. Estudo do tráfego e da viabilidade de dimensionamento de um pavimento ideal para o Campus Morro do Cruzeiro/UFOP–Ouro Preto/MG. 2021.

IPEA. Mobilidade Urbana: Desafios e Soluções. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2015.

JUNIOR, Jocimar Coutinho Rodrigues; DE SANTANA NOGUEIRA, Bárbara; DA SILVA, Juliane Apolinário. VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA SEMAFÓRICO EM UM CRUZAMENTO NO GRANDE ROSA ELZE EM SÃO CRISTÓVÃO/SE. *Conhecimento Interativo*, v. 15, n. 1, p. 162-183, 2021.

LIMA, A. P., & Costa, M. D. Aplicações de Inteligência Artificial na Reprogramação Semafórica. *Revista Brasileira de Mobilidade Urbana*, 18(2), 45-58. 2019

LIMA, Cleiton M. V. **Otimização de Trânsito – Uma Abordagem Utilizando Algoritmos Genéricos**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

LIMA, Wanderson Pereira; DE LUCA ROTHEN, Marcos. Avaliação da eficiência da programação semafórica implantada em cruzamentos de Goiânia utilizando a metodologia do Signal Timing Manual, -Av. 85 com Av. Mutirão. **Anais do Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica do IFG**, v. 15, n. 1, 2022.

MAIA, Maysa da silva. ANÁLISE DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA PARA VEÍCULOS DE CARGA EM UM CORREDOR URBANO DE MANAUS. 2022. 64. engenharia civil. ufam, Manaus 2022.

MENDONÇA, Clivia Leite; COUTINHO, Rojaira Scarpino. Estudo de tráfego: análise operacional da interseção semaforizada entre as Avenidas Fernando Ferrari e Adalberto Simão Nader-Vitória (ES). 2023.

NUNES, Paulo Bruno Souza; CUNTO, Flávio José Craveiro; DE FRANÇA MARQUES, Samuel. ESTIMAÇÃO DO VOLUME DE TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES DE FORTALEZA COM BASE NA KRIGAGEM UNIVERSAL. *Artigo Científico*, v. 2, 2023.

OLIVEIRA, J. S. Sistemas Inteligentes de Controle de Tráfego: Uma análise dos impactos urbanos. *Revista de Engenharia de Transporte*, 32(4), 155-170. 2020

PEREIRA, Dayana Coelho. Análise de desempenho por microssimulação da interseção semaforizada da Avenida José Martins Moreira Rato X Rua Belmiro Teixeira Pimenta, em Jardim Camburi, Vitória-ES. 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM. Decreto publicado em Belém-Pará, Ano LVI, Nº 12.661, 19 set. 2014. Diário Oficial do Município de Belém, 29 set. 2014.

SILVESTRE, R. C. et al. Estudo de tráfego e análise da atual situação viária em interseção localizada no município de São Bento-PB. 2022.

TELES, Patricia Cordela. Avaliação do impacto de estratégias de controle de tráfego em cruzamentos semaforizados isolados. 2021.

APÊNDICE A – Cálculo para Ciclo Semafórico – Método de Webster

Para o Cálculo do Ciclo Semafórico utilizando o método de Webster, foi levado em consideração os seguintes dados:

$$\sum Y = 0,98$$

$$Y_a = 0,55$$

$$Y_b = 0,43$$

$$T_p = 8 \text{ s}$$

Primeiro Passo, encontrar o tempo de ciclo mínimo.

Utilizando a fórmula abaixo.

$$T_{cmín} = \frac{T_p}{1 - (Y_a + Y_b)}$$

Substituindo os valores.

$$T_{cmín} = \frac{8}{1 - (0,55 + 0,43)}$$

Assim,

$$T_{cmín} = 400 \text{ segundos}$$

Segundo passo, determinação do tempo de ciclo ótimo, utilizando a fórmula abaixo:

$$C_{ót} = \frac{(1,5 * T_p) + 5}{1 - (Y_a + Y_b)}$$

Substituindo os valores.

$$C_{ót} = \frac{(1,5 * 8) + 5}{1 - (0,55 + 0,43)}$$

Logo, o valor encontrado, será:

$$C_{ót} = 850 \text{ segundos}$$

E por fim, os tempos de verdes obtidos para cada aproximação, serão:

$$T_v = \frac{(C_{ót} - T_p) * y_i}{Y_a + Y_b}$$

Substituindo os valores para a aproximação 1

$$Tv1 = \frac{(850 - 8) * 0,55}{0,55 + 0,43}$$

Foi obtido o resultado de:

$$Tv1 = 473 \text{ segundos}$$

E para a aproximação 2, o tempo verde obtido foi de:

$$Tv2 = \frac{(850 - 8) * 0,43}{0,55 + 0,43}$$

$$Tv2 = 369 \text{ segundos}$$

APÊNDICE B – Cálculo para Ciclo Semafórico – Método de CET

A primeira parte de cálculos será feita considerando a aproximação congestionada.

Dados:

tv aproximação 1 = 76 segundos

tv aproximação 2 = 60 segundos

tempo de ciclo = 144 segundos

tp = 8 segundos

Fila congestionada José Bonifácio = 18 metros

Fila congestionada Antônio Baena = 12 metros

Espaço ocupado por cada veículo parado na fila = 6 m/veículo/faixa

Intervalo entre veículos em situação de saturação = será usado de acordo com o Hm da aproximação em s/veículo/faixa.

- Hm para aproximação 1 = 2,5 segundos
- Hm para aproximação 2 = 3 segundos

• CÁLCULO PARA ENCONTRAR O TEMPO DE VERDE MÍNIMO

Aproximação 1 – José Bonifácio

Primeiro passo, cálculo da fila normal:

$$\text{Fila normal} = \frac{tv * 6}{Hm}$$

Logo,

$$\text{Fila normal} = \frac{76 * 6}{2,5}$$

$$\text{Fila normal} = 182,4 \text{ metros}$$

$$\text{Fila máxima} = 182,4 + 18 = 200,4 \text{ m}$$

Segundo passo, encontrar o tempo de verde adicional na hora, utilizando a fórmula:

$$\text{tempo de verde adicional na hora} = \frac{\text{Fila congestionada} * Hm}{6}$$

Assim,

$$\text{tempo de verde adicional na hora} = \frac{18 * 2,5}{6} = 7,5 \text{ s/h}$$

Terceiro passo, encontrar o número de ciclos na hora.

$$\text{Número de ciclos na hora} = \frac{3600 \text{ s}}{144 \text{ s}} = 25 \text{ ciclos/h}$$

O quarto passo foi encontrar o tempo de verde adicional.

$$\text{Tempo de verde adicional por ciclo} = \frac{\text{tempo de verde adicional na hora}}{\text{Número de ciclos na hora}}$$

Substituindo os valores,

$$\text{Tempo de verde adicional por ciclo} = \frac{7,5 \text{ s/h}}{25 \text{ ciclos/h}}$$

Logo,

$$\text{Tempo de verde adicional por ciclo} = 0,30 \text{ s/ciclo}$$

Assim, o tempo de verde mínimo, será:

$$\text{Tempo de verde mínimo} = 76 + 0,30 = 76,30 \text{ s}$$

Aproximação 2 – Antônio Baena

Mantendo o raciocínio de cálculos anteriores, serão obtidos os valores:

Primeiro passo:

$$\text{Fila normal} = \frac{60 * 6}{3}$$

$$\text{Fila normal} = 120 \text{ metros}$$

$$\text{Fila máxima} = 120 + 12 = 132 \text{ m}$$

Segundo passo, encontrar o tempo de verde adicional na hora, utilizando a fórmula:

$$\text{tempo de verde adicional na hora} = \frac{12 * 3}{6} = 6 \text{ s/h}$$

Terceiro passo, encontrar o número de ciclos na hora.

$$\text{Número de ciclos na hora} = \frac{3600 \text{ s}}{144 \text{ s}} = 25 \text{ ciclos/h}$$

O quarto passo foi encontrar o tempo de verde adicional.

$$\text{Tempo de verde adicional por ciclo} = \frac{6 \text{ s/h}}{25 \text{ ciclos/h}}$$

Logo,

$$\text{Tempo de verde adicional por ciclo} = 0,24 \text{ s/ciclo}$$

Assim, o tempo de verde mínimo, será:

$$\text{Tempo de verde mínimo} = 60 + 0,24 = 60,24 \text{ s}$$

- CÁLCULO PARA ENCONTRAR OS NOVOS TEMPOS DE CICLO

Primeiro passo, determinar o tempo de verde mínimo na hora por aproximação.

$$\text{tempo de verde mínimo na hora (aprox.1)} = \frac{\text{tempo de verde mínimo} * 3600 \text{ s}}{\text{tempo de ciclo}}$$

Substituindo os valores,

$$\text{tempo de verde mínimo na hora (aprox.1)} = \frac{76,30 \text{ s} * 3600 \text{ s}}{144 \text{ s}}$$

Obtendo um valor de

$$\text{tempo de verde mínimo na hora (aprox.1)} = 1907,5 \text{ s/h}$$

Para a aproximação 2, foi utilizada a mesma fórmula

$$\text{tempo de verde mínimo na hora (aprox.2)} = \frac{60,24 \text{ s} * 3600 \text{ s}}{144 \text{ s}}$$

Obtendo um valor de

$$\text{tempo de verde mínimo na hora (aprox.2)} = 1506 \text{ s/h}$$

Dessa forma, será possível calcular a perda horária máxima, somando os tempos de verde mínimo na hora das aproximações e diminuindo por 3600 segundos.

$$\text{Perda horária máxima} = 3600 - (1907,5 + 1506) = 187 \text{ s/h}$$

O segundo passo, encontrar o número máximo de ciclos

$$\text{Número máximo de ciclos} = \frac{\text{Perda Horária Máxima}}{\text{tempo perdido}}$$

Substituindo os valores

$$\text{Número máximo de ciclos} = \frac{187}{8} = 23 \text{ ciclos/h}$$

Assim, o ciclo mínimo será

$$\text{ciclo mínimo} = \frac{3600 \text{ s/h}}{23 \text{ ciclos/h}}$$

$$\text{ciclo mínimo} = 154 \text{ segundos}$$

O terceiro passo será obter o ciclo ótimo, deve-se trabalhar sempre com tempos de ciclo maiores que os mínimos, aplicando o coeficiente de 1,5 de WEBSTER para se obter o ciclo ótimo, logo.

O ciclo ótimo, será

$$\text{ciclo ótimo} = 1,5 \times \text{ciclo mínimo}$$

$$\text{ciclo ótimo} = 1,5 \times 154 \text{ s}$$

ciclo ótimo = 232 segundos

Para se evitar ciclos excessivamente longos, bem como para facilitar a coordenação de semáforos, pode-se operar com tempos de ciclos variando, ainda de acordo com WEBSTER, de 0,75 até 1,5 do tempo de ciclo ótimo.

$$0,75 * Tc_{\text{ótimo}} < t_c < 1,5 * Tc_{\text{ótimo}}$$

Logo, a faixa aceitável será de

$$0,75 * 232 < t_c < 1,5 * 232$$

$$174 \text{ s} < t_c < 347 \text{ s}$$

O quarto passo será encontrar os novos tempos de verde levando em consideração apenas o tempo de ciclo ótimo mínimo de 174 segundos, será possível determinar os valores de tempo de verde das aproximações.

$$t_{vi} = \frac{t_{v \text{ min}}}{\sum t_{v \text{ min}}} \times (t_c - t_p)$$

Tempo de verde para a aproximação 1:

$$t_{v1} = \frac{1907,5}{3413,5} \times (174 - 8)$$

$$t_{vi} = 93 \text{ segundos}$$

Tempo de verde para a aproximação 2:

$$t_{v2} = \frac{1506}{3413,5} \times (174 - 8)$$

$$t_{vi} = 73 \text{ segundos}$$