UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

Análise do Desempenho Operacional de uma Interseção Semaforizada em Belém–PA

MATEUS LIMA COSTA

BELÉM, PA
2026

MATEUS LIMA COSTA

Análise do Desempenho Operacional de uma Interseção Semaforizada em Belém–PA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil no Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Christiane Lima Barbosa

BELÉM, PA

2026

MATEUS LIMA COSTA

ANÁLISE DO DESEMPENHO OPERACIONAL DE UMA INTERSEÇÃO SEMAFORIZADA EM BELÉM–PA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 27 / 02 / 2026.

Examinadores

gov.br Documento assinado digitalmente
CHRISTIANE LIMA BARBOSA
Data: 03/03/2026 10:46:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professora Drª. Christiane Lima Barbosa
Universidade Federal do Pará | UFPA
Orientadora

gov.br Documento assinado digitalmente
RITA DE CASSIA MONTEIRO DE MORAES
Data: 27/02/2026 11:25:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professora Drª. Rita de Cássia Monteiro de Moraes
Universidade Federal do Pará | UFPA
Membro da banca

gov.br Documento assinado digitalmente
MARCUS VINICIUS GUERRA SERAPHICO DE ASSI
Data: 02/03/2026 09:52:02-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Marcus Vinicius Guerra Seraphico de Assis Carvalho
Universidade Federal do Pará | UFPA
Membro da banca

Conceito: E (Excelente)

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Sandra, ao meu pai, Givanildo, e às minhas irmãs, Mariana e Maria Clara. Dedico este trabalho a vocês, pelo apoio constante, pela confiança e pelos valores que sempre me transmitiram ao longo da minha trajetória. Esta conquista é também resultado da presença, do incentivo e do exemplo de cada um de vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha trajetória durante a graduação.

Aos meus pais, Sandra e Givanildo, pelo apoio constante, pelos valores transmitidos e pela confiança que sempre depositaram em mim. O incentivo de vocês foi essencial para que eu pudesse seguir em frente, mesmo diante das dificuldades. Às minhas irmãs, Mariana e Maria Clara, pelo carinho, pela companhia e pelo apoio ao longo dessa jornada. A presença de vocês trouxe momentos de leveza que tornaram esse período ainda mais especial.

Às minhas tias Lorena Lima e Marluci Albuquerque e ao meu tio Ricardo Rodrigues, pelo apoio e incentivo durante essa caminhada. Aos meus primos Tiago Chagas, Silvia Chagas e à pequena Isis, que foram um importante suporte nos momentos em que estive longe de casa.

Aos meus amigos Natan Bitencourt, Vanessa Carvalho e Yury Araújo, pela amizade e pelos momentos de descontração que contribuíram para tornar essa jornada mais leve e equilibrada.

Aos meus colegas de trabalho e amigos de escritório, Kauria Vilhena, Yury Neri, João Campos, Ewerton Bruno, Isac Rodrigues, Scarlet Louise e Tábita Andrade, pela parceria, pela convivência e pela troca de experiências no cotidiano profissional. Aos profissionais Adrian Rojas e Mário Melo, pelos conhecimentos e ensinamentos compartilhados, bem como a toda a equipe da Bel Casa, pela oportunidade de aprendizado e pela experiência adquirida.

À minha orientadora, Prof.ª Dr.ª Christiane Lima Barbosa, pela orientação, paciência e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Aos professores do curso de Engenharia Civil e aos colegas de universidade, pelos conhecimentos compartilhados durante a formação acadêmica.

À Universidade Federal do Pará e à Faculdade de Engenharia Civil, pela formação proporcionada e pelas oportunidades de desenvolvimento ao longo desse percurso.

Por fim, ao Paysandu Sport Club, maior campeão da região Norte, cuja história de luta, identidade e "*Payxão*" sempre me lembrou que a perseverança também faz parte das grandes conquistas.

RESUMO

O controle semafórico é fundamental para a organização do tráfego em áreas urbanas, especialmente em interseções com elevado fluxo de veículos e pedestres. Este trabalho apresenta uma análise comparativa dos ciclos semafóricos em um cruzamento situado na interseção entre a Avenida Nossa Senhora de Nazaré e a Avenida Generalíssimo Deodoro, em Belém (PA). Objetivou-se avaliar o ciclo semafórico atual em operação e propor um ciclo ideal com base nas demandas veiculares constatadas. Utilizando metodologia aplicada, o estudo realizou um levantamento bibliográfico e normativo, seguido de coleta de dados in loco na hora crítica (17h30 – 18h30), incluindo fluxos de veículos classificados por tipo e por movimento e, identificou um ciclo vigente de 148 segundos. A análise contemplou o dimensionamento conforme o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V, utilizando o método Webster, que resultou em um ciclo teórico de 294 segundos, evidenciando elevada saturação. Para fins de proposição, adotou-se um ciclo de 120 segundos, conforme recomendações normativas, observando-se que os movimentos principais (MV1 e MV3) mantiveram graus de saturação críticos (x = 1,06). Os resultados indicam que a otimização dos tempos de verde deve ser acompanhada por medidas de gestão do espaço viário, como o controle de estacionamentos nas aproximações, para garantir a fluidez e segurança viária na interseção. A proposta de ciclo ideal busca otimizar os tempos de verde e entreverdes para reduzir atrasos e melhorar a fluidez e segurança viária na interseção. Este estudo contribui para o aprimoramento do controle semafórico em Belém, fornecendo uma análise detalhada que pode embasar políticas públicas e decisões técnicas voltadas à melhoria da mobilidade urbana e segurança no tráfego.

Palavras-chave: Interseção; Engenharia de Tráfego; Ciclo semafórico; Entreverdes.

ABSTRACT

Traffic signal control is fundamental for organizing traffic in urban areas, especially at intersections with high vehicle and pedestrian flow. This work presents a comparative analysis of traffic signal cycles at a crossroads located at the intersection between Nossa Senhora de Nazaré Avenue and Generalíssimo Deodoro Avenue, in Belém (PA). The objective is to evaluate the current traffic signal cycle in operation and propose an ideal cycle based on observed vehicular demands. Using applied methodology, the study began with bibliographic and normative research, followed by on-site data collection, including vehicle flows classified by type and movement. The intersection has two approaches and four main vehicular movements, regulated by three vehicular focal groups and four pedestrian signals. The analysis included traffic signal dimensioning according to the Brazilian Traffic Signaling Manual – Volume V, and CONTRAN standards, using parameters such as equivalent traffic volume, occupancy rate, lost time, intergreen time, and application of the Webster method for calculating the optimal cycle. The ideal cycle proposal seeks to optimize green and intergreen times to reduce delays and improve traffic flow and safety at the intersection. This study contributes to the improvement of traffic signal control in Belém, providing a detailed analysis that can support public policies and technical decisions aimed at improving urban mobility and traffic safety.

Keywords: Intersection; Dimensioning; Traffic signal cycle; Intergreen.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Semáforos para sinalização semafórica de regulamentação. 16

Figura 2 - Semáforos para sinalização semafórica de advertência. 17

Figura 3 - Foco em led e grupo focal. 18

Figura 4 - Anteparo. 18

Figura 5 - Elementos de sustentação. 19

Figura 6 - Aproximação e Movimento. 19

Figura 7 - Diagrama de estágios. 21

Figura 8 - Diagrama de intervalos luminosos. 21

Figura 9 - Fator de equivalência. 22

Figura 10 - Distâncias de percurso do veículo na aproximação. 24

Figura 11 - Diagnóstico de Trânsito na Interseção. 30

Figura 12 - Pontos de Observação e Coleta. 32

Figura 13 - Aproximações e Movimentos da Interseção. 33

Figura 14 - Grupos Focais. 33

Figura 15 - Semáforo para Pedestres. 34

Figura 16 - Planta Baixa da Interseção. 34

Figura 17 - Diagrama de Estágios da Interseção. 35

Figura 18 - Diagrama de intervalos luminosos atual. 36

Figura 19 - Estacionamento Não Regulamentado na Avenida Nazaré. 43

Figura 20 - Estacionamento Não Regulamentado na Avenida Generalíssimo. 44

Figura 21 - Diagrama de Intervalos Luminosos do Cenário 1 com Ciclo de 120 s. 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo mínimo de amarelo de acordo com o limite de velocidade. 26

Tabela 2 - Volume veicular observado por movimento na hora crítica. 37

Tabela 3 - Volume de tráfego equivalente por movimento (ucp/h). 38

Tabela 4 - Faixas efetivas por movimento veicular. 39

Tabela 5 - Fluxo de saturação por movimento (ucp/h). 39

Tabela 6 - Taxa de ocupação por movimento. 40

Tabela 7 - Tempos de verde efetivo com ciclo de 120 s. 41

Tabela 8 - Grau de saturação dos movimentos com ciclo de 120 s. 41

Tabela 9 - Comparação dos tempos de ciclo.....42

Tabela 10 - Comparação dos Parâmetros Operacionais entre os Cenários 0 e 1. 48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

CTB – Código de Trânsito Brasileiro

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

CET-SP – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo

MBST – Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito

GS – Grupo Semafórico

GM – Grupo de Movimentos

MV – Movimento Veicular

FS – Fluxo de Saturação

UCP – Unidade de Carro de Passeio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivo 14
1.1.1 Objetivo Geral 14
1.1.2 Objetivos Específicos 14
1.2 Estrutura do Trabalho 14
2. REFERENCIAL TEÓRICO 15
2.1 Interseção 15
2.2 Sinalização semafórica 15
2.2.1 Semáforo 16
2.2.2 Grupo Focal e Foco Semafórico 17
2.2.3 Elementos de Sustentação e Anteparo 18
2.3 Definições 19
2.3.1 Movimentos 19
2.3.2 Aproximação 19
2.3.3 Estágio 20
2.3.4 Ciclo 20
2.3.5 Intervalo Luminoso 20
2.3.6 Diagrama de Estágios 20
2.3.7 Grupo de Movimentos Críticos 21
2.3.8 Travessia Tipo Carona 21
2.3.9 Diagrama de Intervalos Luminosos 21
2.4 Dimensionamento do Semáforo 22
2.4.1 Volume de Tráfego Equivalente 22
2.4.2 Fluxo de Saturação 22
2.4.2.1 Tempo perdido de um ciclo 22
2.4.2.2 Taxa de Ocupação 23

2.4.2.3 Entreverdes 24
2.4.2.3.1 Entreverdes Para Veículos 24
2.4.2.3.1.1 Tempo de Amarelo 25
2.4.2.3.1.2 Vermelho Geral 25
2.4.2.3.1.3 Considerações 26
2.4.2.3.1 Entreverdes Para os Pedestres 26
2.4.2.4 Grau de Saturação 26
2.4.2.5 Método Webster 27
2.4.2.6 Tempo de Verde 27
2.4.2.6.1 Tempo de Verde Efetivo 27
2.4.2.6.2 Tempo de Verde Real 28
3. METODOLOGIA 29
3.1 Caracterização da Pesquisa 29
3.1.1 Caracterização do Objeto de Estudo 29
3.2 Objeto de Estudo 32
3.3 Estrutura Semafórica 33
3.4 Diagrama de Estágios 35
3.5 Diagrama de Intervalos Luminosos 36
4. DETERMINAÇÃO DE UM NOVO CICLO SEMAFÓRICO 37
4.1 Organização dos Volumes Veiculares Observados na Hora Crítica 37
4.2 Conversão dos Volumes para Unidade de Carro de Passeio (UCP) 37
4.3 Definição dos Estágios Semafóricos e Grupos de Movimentos 38
4.4 Caracterização das Faixas Efetivas por Movimento 38
4.5 Determinação do Fluxo de Saturação dos Movimentos 39
4.6 Cálculo da Taxa de Ocupação e Identificação dos Grupos Críticos 39
4.7 Cálculo do Tempo de Ciclo pelo Método de Webster 40
4.8 Adoção do Ciclo Recomendado e Distribuição dos Tempos de Verde 41

4.9 Análise Comparativa da Capacidade e do Grau de Saturação 41
4.10 Comparação dos Ciclos Semafóricos 42
4.10.1 Síntese Comparativa 42
4.10.1.1 Comparação entre o Ciclo Atual e o Ciclo Teórico 45
4.10.1.2 Comparação entre o Ciclo Atual e o Ciclo Adotado 45
5. CONCLUSÕES 49
6. REFERÊNCIAS 52
APÊNDICE A - PLANTA BAIXA DA INTERSEÇÃO (ESCALA AMPLIADA) 54

1. INTRODUÇÃO

O controle do tráfego por meio de semáforos é um dos instrumentos mais importantes para organizar a circulação em áreas urbanas, especialmente em interseções que apresentam elevados volumes de veículos e pedestres. Sua função principal é regular o fluxo em diversas direções, garantindo tanto a segurança viária quanto a fluidez no deslocamento (Melo Neto et al., 2021). Em particular, o dimensionamento dos ciclos semafóricos, que inclui os tempos de verde, amarelo e vermelho, é crucial para equilibrar a oferta e a demanda de tráfego.

Estudos acadêmicos indicam que a escolha adequada do ciclo semafórico influencia diretamente os níveis de serviço das vias. Um estudo conduzido em Campina Grande (PB) demonstrou que a instalação de semáforos em rotatórias reduziu conflitos e aprimorou o desempenho operacional, reforçando a importância de análises comparativas entre diferentes configurações de ciclos para identificar os parâmetros que melhor se adequam às condições locais (Melo Neto et al., 2021).

No contexto de Belém, capital do Pará, os desafios da mobilidade urbana relacionam-se a fatores como alta taxa de motorização, saturação em corredores estruturais como a Avenida Almirante Barroso e a Avenida Pedro Álvares Cabral, e a ausência de integração eficiente entre os dispositivos de controle de tráfego. Nessas condições, a análise comparativa dos ciclos semafóricos em cruzamentos urbanos torna-se ferramenta essencial para identificar limitações do sistema atual e propor soluções que melhorem a eficiência do tráfego.

Além dos aspectos operacionais, é fundamental avaliar como diferentes ciclos semafóricos impactam o tempo médio de viagem, o acúmulo de filas e a segurança dos pedestres. Essas análises fornecem subsídios para as políticas locais de mobilidade urbana e embasam decisões para modernizar o sistema semafórico, seja por meio da otimização dos ciclos fixos existentes, seja pela adoção de técnicas adaptativas.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa dos ciclos semafóricos em um cruzamento urbano de Belém, considerando a demanda veicular atual. Para isso, compara-se o tempo semafórico implantado e em operação com o tempo proposto como ciclo semafórico ideal para a interseção.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa entre o ciclo semafórico atual, em operação, com o ciclo ideal em um cruzamento urbano de Belém.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a operação do semáforo da interseção entre as Avenidas Nossa Senhora de Nazaré e Generalíssimo Deodoro, incluindo tempos dos ciclos vigentes e fluxo de veículos.
- Aplicar o método Webster do CONTRAN (2014) para o dimensionamento semafórico considerando o volume de tráfego equivalente, o intervalo entre verdes (entreverdes), o tempo perdido, a taxa de ocupação e o grupo de movimentos críticos.
- Propor um novo ciclo semafórico otimizado para a interseção estudada.
- Comparar o desempenho do ciclo semafórico atual com o proposto, utilizando indicadores de eficiência como tempo total do ciclo, percentual de tempo verde e tempo perdido.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro apresenta a introdução com os objetivos e a justificativa. O segundo traz o referencial teórico sobre sinalização semafórica e dimensionamento de ciclos. O terceiro detalha a metodologia adotada, incluindo a coleta e análise de dados. O quarto capítulo expõe os resultados da análise comparativa dos ciclos semafóricos atuais e propostos. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações para melhorias no controle semafórico da interseção estudada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o referencial teórico que sustenta o desenvolvimento do trabalho e orienta as análises relativas ao dimensionamento do ciclo semafórico. Partindo dos fundamentos de engenharia de tráfego e de segurança viária aplicados à definição de tempos de sinal, estabelecem-se as bases conceituais e metodológicas que serão empregadas ao longo do estudo.

No contexto brasileiro, adota-se como eixo normativo o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V: Sinalização Semafórica, publicado pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), aprovado pela Resolução CONTRAN nº 483/2014 e por normativas subsequentes. Tal documento consolida a metodologia oficial para a programação semafórica, aplicável tanto a interseções isoladas quanto a sistemas semafóricos coordenados. Embora existam outros documentos técnicos elaborados por órgãos gestores municipais, estes, em geral, encontram-se alinhados e espelhados nas diretrizes estabelecidas pela referida resolução. Como exemplo, destacam-se as publicações da Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET-SP), publicadas em 2021.

Assim, este tópico apresenta, de maneira objetiva, as definições, variáveis e procedimentos de cálculo dos tempos semafóricos adotados neste estudo, fundamentados na Resolução CONTRAN nº 483/2014 e atos complementares.

2.1 Interseção

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005), a interseção é a área onde duas ou mais vias se encontram, podendo ocorrer de forma a nível (interseção em plano) ou desnível (interseção em níveis diferentes). As interseções em nível referem-se a cruzamentos no mesmo plano, enquanto as interseções em níveis diferentes, também chamadas de interconexões, envolvem graus distintos de elevação entre as vias.

2.2 Sinalização semafórica

A sinalização semafórica, como subsistema da sinalização viária, compõe-se de indicações luminosas acionadas de forma alternada ou intermitente por sistemas eletromecânicos ou eletrônicos (CONTRAN, 2014). Tem como finalidade ordenar os movimentos e atribuir prioridades de passagem em interseções e travessias, promovendo segurança e fluidez para veículos e pedestres.

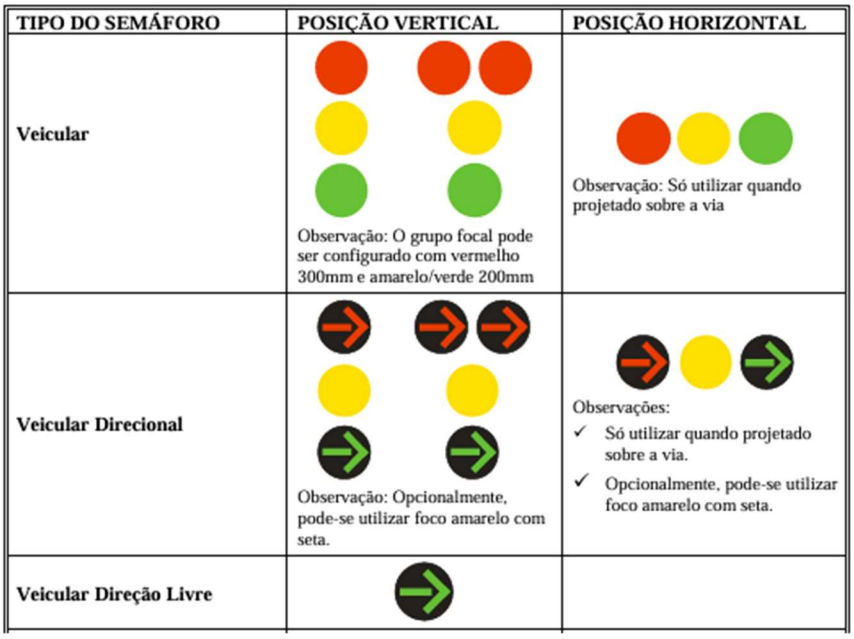
Classificadas segundo a sua função, elas são regulamentares e de advertência. Na função de regulamentação, utilizam indicações luminosas para estabelecer a ordem de parada, atenção e passagem, além de distribuir prioridades entre fluxos de veículos e pedestres. Já na função de advertência, as sinalizações operam em regime intermitente, servindo principalmente para alertar os usuários sobre condições de risco ou situações especiais na via.

2.2.1 Semáforo

O semáforo é definido como um conjunto constituído pela montagem de um ou mais focos luminosos com suas faces direcionadas ao sentido do movimento (CONTRAN, 2014). Esses grupos focais são empregados na sinalização semafórica para regulamentação e advertência do tráfego, conforme previsto na Resolução nº 160, de 2004, do CONTRAN, que está incluída no Anexo II do Código de Trânsito Brasileiro (CTB).

Na Figura 1, apresentam-se os semáforos utilizados na sinalização semafórica de regulamentação, que podem ser classificados como: veicular, veicular direcional, veicular de direção livre, veicular de controle de acesso, veicular de faixa reversível, pedestres e ciclistas. Já na Figura 2, encontra-se um exemplo de semáforo para sinalização semafórica de advertência, que, conforme o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2014), deve ser composto por um ou dois focos amarelos em funcionamento intermitente.

Figura 1 - Semáforos para sinalização semafórica de regulamentação.



Veicular Controle de Acesso Específico		
Veicular Controle ou Faixa Reversível	Em semáforos de LED pode ser usado foco único.	
Pedestre		
Ciclista		

Fonte: CONTRAN (2014, p.28).

Figura 2 - Semáforos para sinalização semafórica de advertência.

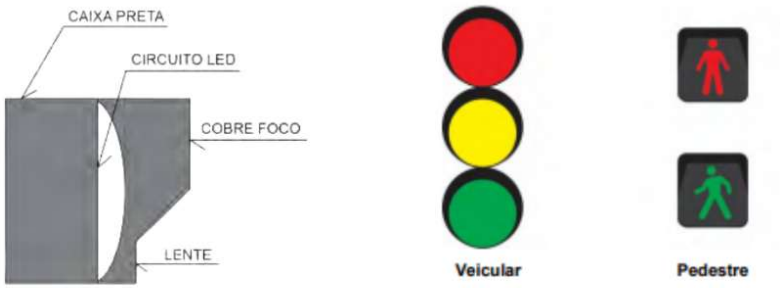
TIPO DO SEMÁFORO	POSIÇÃO VERTICAL	POSIÇÃO HORIZONTAL
Veicular		

Fonte: CONTRAN (2014, p.29).

2.2.2 Grupo Focal e Foco Semafórico

Segundo a CET-SP (2021, p. 33), o foco semafórico é definido como “o elemento que emite a indicação luminosa colorida, utilizando as funções de regulamentação ou advertência”, sendo constituído pelos seguintes componentes: conjunto óptico, máscara, pestana ou cobre-foco e caixa porta-foco. O grupo focal, por sua vez, é caracterizado como “o conjunto de focos, com uma determinada composição de cores, que emite as indicações luminosas de forma alternada ou intermitente” (CET-SP, 2021, p. 33), conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Foco em led e grupo focal.

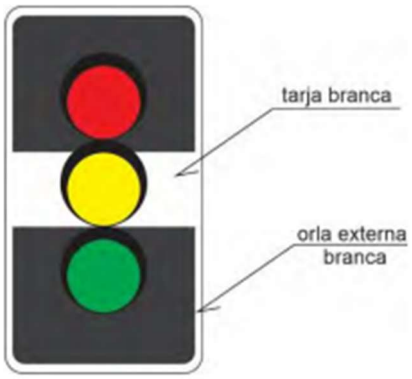


Fonte: CETSP (2021).

2.2.3 Elementos de Sustentação e Anteparo

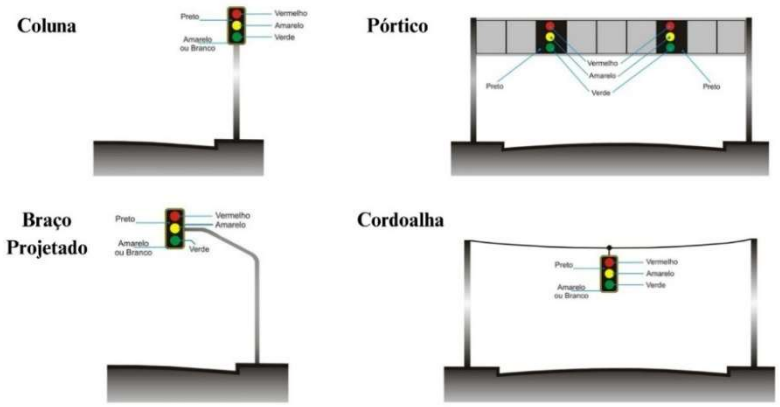
Existem várias formas de sustentar um semáforo em uma via, sendo quatro as principais maneiras de implantação: em coluna, em braço projetado, por cordoalha ou em pórtico (CONTRAN, 2014), utilizando elementos de suporte que devem ser pintados em cinza ou preto fosco, de modo a não comprometer a visibilidade do grupo focal. Além disso, os anteparos, que são painéis que emolduram o grupo focal, contribuem para melhorar a visibilidade e destacar a sinalização, sendo que, no caso de semáforo instalado em braço projetado sobre a via, o uso do anteparo torna-se obrigatório. O anteparo é definido como um dispositivo de chapa metálica, de forma retangular, pintado na cor preta, com tarja e orla externa brancas que envolvem os grupos focais, conforme o CETSP (2021), possibilitando melhor contraste e visibilidade dos focos luminosos e garantindo a adequada identificação da sinalização pelos usuários da via.

Figura 4 - Anteparo.



Fonte: CETSP (2021).

Figura 5 - Elementos de sustentação.



Fonte: CONTRAN (2014), Adaptada Pelo Autor.

2.3 Definições

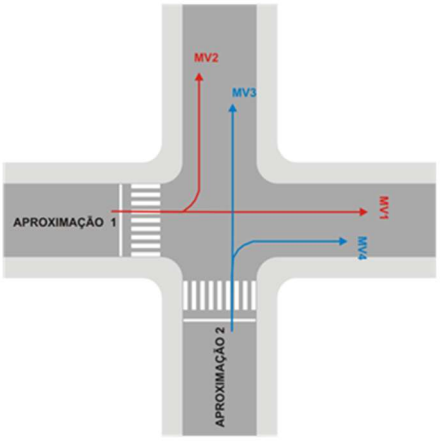
2.3.1 Movimentos

Em uma interseção ou trecho viário localizado em meio de quadra, o termo movimento designa o fluxo de veículos que compartilham a mesma origem e destino. Ou seja, refere-se ao conjunto de veículos que realizam o mesmo percurso dentro da interseção (CONTRAN, 2014).

2.3.2 Aproximação

O termo aproximação se aplica aos trechos de via que antecedem a interseção, por onde os veículos acessam a área de cruzamento (CONTRAN, 2014).

Figura 6 - Aproximação e Movimento.



Fonte: CONTRAN (2014).

2.3.3 Estágio

O estágio é o intervalo de tempo durante o qual um ou mais grupos de movimentos recebem, simultaneamente, o direito de passagem, compreendendo o período em que o semáforo permanece na indicação verde, seguido pelo intervalo denominado entreverdes, o qual possibilita a transição segura entre os ciclos de luz (CONTRAN, 2014). A duração do estágio corresponde à soma do tempo de verde acrescida dos tempos dos intervalos luminosos referentes aos entreverdes dos grupos semafóricos que possuem direito de passagem no respectivo estágio (CET-SP, 2021).

2.3.4 Ciclo

O ciclo corresponde à sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica, na qual cada um dos estágios indispensáveis ocorre, no mínimo, uma vez. A duração total do ciclo, também denominada tempo de ciclo, é obtida pela soma dos tempos de todos os estágios programados para controlar o tráfego em uma interseção ou seção de via (CONTRAN, 2014; CET-SP, 2021).

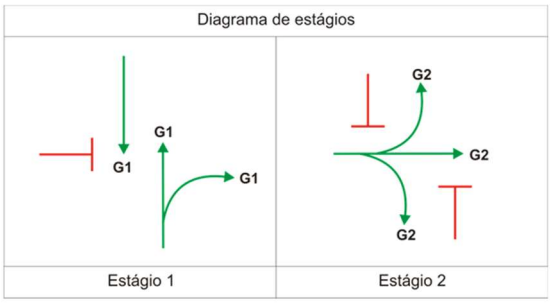
2.3.5 Intervalo Luminoso

O período durante o qual a configuração luminosa dos semáforos (grupos focais) permanece constante, sem alterações, é denominado intervalo de estabilidade. Esse intervalo refere-se ao tempo em que os sinais luminosos que controlam o tráfego em determinado local mantêm a indicação (CONTRAN, 2014).

2.3.6 Diagrama de Estágios

O diagrama de estágios representa visualmente como os diferentes movimentos de veículos e pedestres são distribuídos ao longo dos estágios de um ciclo semafórico. A presença dos movimentos de pedestres e ciclistas no diagrama ocorre somente quando esses são controlados por grupos focais específicos, dedicados a esses usuários (CONTRAN, 2014).

Figura 7 - Diagrama de estágios.



Fonte: CONTRAN (2014).

2.3.7 Grupo de Movimentos Críticos

Segundo o CONTRAN (2014), o grupo de movimentos críticos de um estágio é aquele que apresenta a maior taxa de ocupação entre os movimentos que recebem o direito de passagem, ou seja, o sinal verde, nesse estágio.

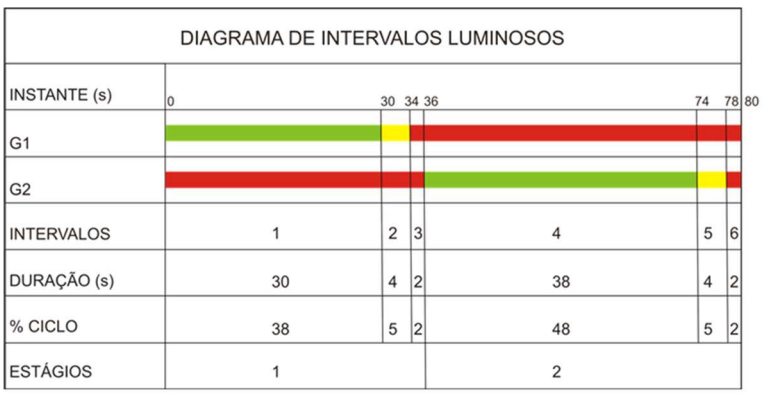
2.3.8 Travessia Tipo Carona

Quando a travessia de pedestres ocorre junto a um estágio veicular (travessia do tipo carona), o tempo de verde do grupo focal de pedestres é definido conforme a duração desse estágio (CONTRAN, 2014).

2.3.9 Diagrama de Intervalos Luminosos

O diagrama de tempos apresenta a duração e a ordem dos intervalos luminosos e dos estágios através de barras horizontais, vinculando essas informações aos grupos semafóricos correspondentes que controlam o tráfego (CONTRAN, 2014).

Figura 8 - Diagrama de intervalos luminosos.



Fonte: CONTRAN (2014).

2.4 Dimensionamento do Semáforo

2.4.1 Volume de Tráfego Equivalente

O desempenho dos veículos varia conforme suas características específicas. Os automóveis, também chamados veículos leves na literatura técnica, possuem maior agilidade no trânsito em comparação aos veículos comerciais. Para uniformizar a medida do volume de tráfego em uma via, utiliza-se o conceito de veículo equivalente, no qual o automóvel é tomado como referência e recebe fator de equivalência igual a 1,0 unidade de carro de passeio (ucp), conforme a Figura 9 (CONTRAN, 2014).

Figura 9 - Fator de equivalência.

TIPO	FATOR DE EQUIVALÊNCIA
Automóvel	1,00
Moto	0,33
Ônibus	2,00
Caminhão (2 eixos)	2,00
Caminhão (3 eixos)	3,00

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2 Fluxo de Saturação

O fluxo de saturação é o número máximo de veículos que podem passar por uma aproximação semafórica se o sinal verde for mantido continuamente por uma hora. Esse valor depende das condições da via, do tráfego e do ambiente. Entre as características da via que mais influenciam estão a topografia, a geometria, o número e a largura das faixas, além do estado do pavimento (CONTRAN, 2014).

2.4.2.1 Tempo perdido de um ciclo

O tempo perdido total em um ciclo semafórico corresponde ao intervalo durante o qual os veículos permanecem parados. Esse tempo ocorre devido a dois fatores principais: o estágio destinado aos pedestres, que suspende o tráfego de veículos, e as trocas entre os estágios semafóricos, que asseguram a segurança na interseção. O cálculo desse tempo perdido pode ser realizado por meio da equação 1, conforme indicado pelo Conselho Nacional de Trânsito (2014).

Equação 1,

$$T_p = T_{ep} + \sum_{i=1}^{n} (t_{pin_i} + t_{pfn_i})$$

Em que,

T_p - tempo perdido total, em segundos;

T_{ep} - tempo de estágio exclusivo para pedestres, caso existente, em segundos;

n - número de estágios veiculares existente;

t_{pin_i} - tempo perdido no início do estágio i, em segundos;

t_{pfn_i} - tempo perdido no final do estágio i, em segundos.

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.2 Taxa de Ocupação

A taxa de ocupação (γ) representa a relação entre a taxa de fluxo de veículos e o fluxo de saturação, ambos expressos na mesma unidade (CONTRAN, 2014). Esse índice indica a proporção do fluxo real em relação à capacidade máxima da via, conhecida como fluxo de saturação. A taxa é calculada conforme a Equação 2.

Equação 2,

$$y = \frac{F}{FS}$$

Em que,

y - taxa de ocupação.,

F - taxa de fluxo do grupo de movimentos, em veículos por hora, ou ucp por hora;

FS - fluxo de saturação do grupo de movimentos, em veículos por hora ou ucp por hora.

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.3 Entreverdes

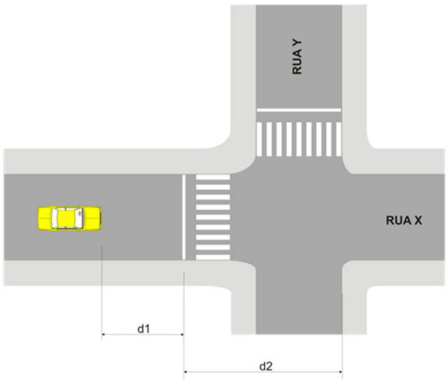
O entreverdes é o intervalo de tempo programado imediatamente após o término do período de verde em um estágio semafórico, correspondendo ao tempo de transição entre o encerramento do verde de um grupo de movimentos e o início do verde do estágio seguinte, durante o qual ocorre a transferência do direito de passagem entre os grupos semafóricos (CONTRAN, 2014).

No caso de grupos semafóricos veiculares, o entreverdes é composto pelo tempo de amarelo seguido do tempo de vermelho de limpeza, enquanto, para os grupos semafóricos de pedestres, consiste no tempo de vermelho intermitente seguido do tempo de vermelho de limpeza (CET-SP, 2021).

2.4.2.3.1 Entreverdes Para Veículos

O tempo de entreverdes, intervalo que inclui o amarelo e o vermelho geral, tem por objetivo assegurar que os veículos já dentro da interseção (d_2) a desocupem com segurança e que os que se aproximam, a certa distância da linha de retenção (d_1), consigam parar em condições seguras (CONTRAN, 2014). A Figura 10 exemplifica essa situação, e Equação 3 demonstra o procedimento para calcular o entreverdes.

Figura 10 - Distâncias de percurso do veículo na aproximação.



Fonte: CONTRAN (2014).

Equação 3,

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)} + \frac{d_2 + c}{v}$$

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Em que,

t_{ent} - tempo de entreverdes para o grupo focal de veículos; em segundos;

t_{pr} - tempo de percepção e reação do condutor, em segundos;

v - velocidade do veículo, em m/s;

a_{ad} - máxima taxa de frenagem admissível em via plana, em m/s2;

i - inclinação da via na aproximação, sendo "+" em rampas ascendentes e "- "em rampas descendentes (m/m);

g - aceleração da gravidade (9,8 m/s2);

d_2 - extensão da trajetória do veículo entre a linha de retenção e o término da área de conflito, em metros;

c - comprimento do veículo, em metros.

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.3.1.1 Tempo de Amarelo

Na composição do tempo de entreverdes, o tempo de amarelo (t_{am}) deve corresponder à soma das duas primeiras parcelas da Equação 3.

Equação 4,

$$t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)}$$

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.3.1.2 Vermelho Geral

Na composição do tempo de entreverdes, o tempo de vermelho geral t_{vg} corresponde à última parcela da Equação.

Equação 5,

$$\frac{d_2 + c}{v}$$

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.3.1.3 Considerações

Os valores mínimos para o tempo do sinal amarelo são definidos de acordo com a velocidade permitida em cada trecho, com o intuito de garantir a segurança no trânsito.

Esse tempo não deve ultrapassar cinco segundos; caso o cálculo indique um tempo maior, o excedente deve ser incorporado ao intervalo do sinal vermelho, conforme estabelecido pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2014).

Normalmente, adota-se um período de percepção de 1,0 segundo e uma taxa de frenagem de 3,0 m/s². Para fluxos compostos principalmente por automóveis, considera-se um comprimento médio de 5,0 metros por veículo. Esses parâmetros estão em conformidade com as diretrizes do CONTRAN (2014).

Tabela 1 - Tempo mínimo de amarelo de acordo com o limite de velocidade.

Velocidade Máxima	Tempo de amarelo mínimo (s)
≤ 40 km/h	3
50 km/h ou 60 km/h	4
70 km/h	5

Fonte: Autor (2025).

2.4.2.3.1 Entreverdes Para os Pedestres

Conforme o CONTRAN (2014), o entreverdes destinado aos pedestres compreende, essencialmente, os intervalos de vermelho intermitente e de vermelho geral. O vermelho intermitente deve durar o bastante para que quem iniciou a travessia no verde a conclua com segurança, considerando a velocidade usual de caminhada. Neste estudo, por se tratar de travessia em carona, o tempo de entreverdes para pedestres não será calculado.

2.4.2.4 Grau de Saturação

Segundo o CONTRAN (2014), o grau de saturação expressa a quão próxima a aproximação está de sua capacidade de atender ao grupo de movimentos. À medida que aumenta a relação entre a taxa de fluxo do grupo de movimentos e a capacidade, a aproximação se torna mais próxima da saturação. Para determinar o grau de saturação, utiliza-se a **Equação 6**.

Equação 6,

$$x = \frac{F}{Cap}$$

Em que,

x - grau de saturação;

F - taxa de fluxo do grupo de movimentos, em veículos por hora, ou ucp por hora;

Cap - capacidade, em veículos por hora, ou ucp por hora.

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.5 Método Webster

De acordo com o CONTRAN (2014), o método de Webster calcula o tempo de ciclo ideal para interseções semaforizadas, buscando minimizar o atraso médio dos veículos. O método foi originalmente proposto por Webster (1958) e permanece como uma das formulações clássicas para o dimensionamento de ciclos em interseções isoladas.

Equação 7,

$$t_{co} = \frac{1{,}5 \times T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i}$$

t_{co} - tempo de ciclo ótimo, em segundos;

T_p - tempo perdido total, em segundos;

y_i - taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i;

n - número de estágios.

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.6 Tempo de Verde

2.4.2.6.1 Tempo de Verde Efetivo

A **Equação 8** calcula o tempo de verde efetivo, que, segundo o CONTRAN (2014), é o tempo de verde do estágio que seria efetivamente utilizado pelo fluxo do grupo de movimentos crítico, se este fosse descarregado com valor igual ao fluxo de saturação.

Equação 8,

$$t_{v,efet,i} = (t_c - T_p) \times \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i}$$

Em que,

$t_{v,ef,i}$ - tempo de verde efetivo do estágio i, em segundos;

t_c - tempo de ciclo, em segundos;

T_p - tempo perdido total, em segundos;

y_i - taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i;

n - número de estágios.

Fonte: CONTRAN (2014).

2.4.2.6.2 Tempo de Verde Real

O tempo de verde real de um estágio é definido como o período em que um grupo focal de tráfego recebe o sinal verde durante um ciclo semafórico (CONTRAN, 2014). E é calculado através da **Equação 9**.

Equação 9,

$$t_{v,real} = t_{v,efet} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn}$$

$t_{v,real}$ - tempo de verde real, em segundos;

$t_{v,efet}$ - tempo de verde efetivo, em segundos;

t_{ent} - tempo de entreverdes, em segundos;

t_{pin} - tempo perdido no início, em segundos;

t_{pfn} - tempo perdido no final, em segundos.

Fonte: CONTRAN (2014).

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Pesquisa

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em quatro etapas principais. Inicialmente realizou-se a caracterização geométrica e operacional da interseção analisada, incluindo a identificação das aproximações, número de faixas e configuração dos movimentos veiculares. Em seguida, foram realizadas contagens classificatórias de tráfego por movimento e por tipo de veículo, em intervalos de 15 minutos, conforme recomendações do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006). Na terceira etapa, os volumes observados foram organizados e convertidos em unidades de carros de passeio (ucp), permitindo a aplicação das equações de dimensionamento semafórico descritas no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V (CONTRAN, 2014). Por fim, foi realizada a análise comparativa entre o ciclo atualmente em operação e o ciclo calculado a partir do Método de Webster, avaliando-se os parâmetros de capacidade e grau de saturação dos movimentos críticos da interseção.

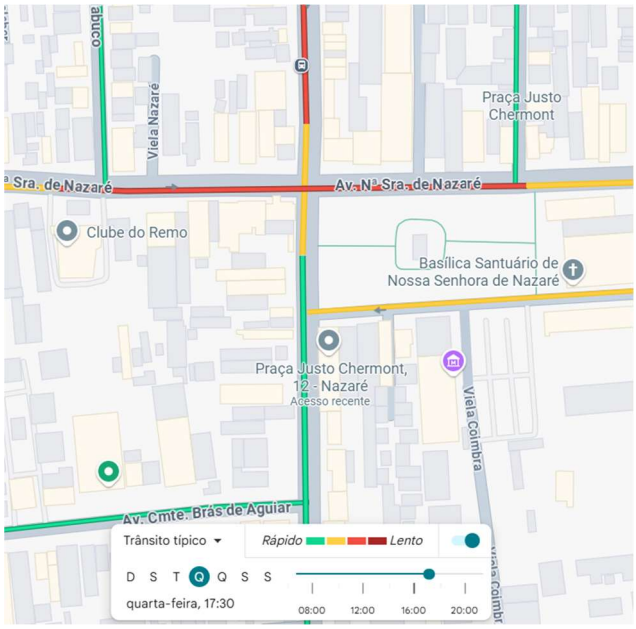
3.1.1 Caracterização do Objeto de Estudo

Este estudo teve como objetivo analisar o desempenho operacional de uma interseção semaforizada localizada no município de Belém–PA, por meio da avaliação do ciclo semafórico vigente e da proposição de um novo ciclo dimensionado com base em critérios técnicos. Inicialmente, realizou-se levantamento bibliográfico com a finalidade de contextualizar a temática e fundamentar a escolha dos procedimentos metodológicos adotados, especialmente aqueles relacionados ao dimensionamento semafórico e à análise do desempenho operacional de interseções urbanas.

A área de estudo compreende a interseção entre a Avenida Nossa Senhora de Nazaré e a Avenida Generalíssimo Deodoro, situada na região central de Belém. A Avenida Nossa Senhora de Nazaré constitui um importante eixo viário urbano, funcionando como corredor de ligação entre o centro da cidade e os bairros localizados ao sul e sudeste da capital paraense. A região caracteriza-se pela concentração de atividades comerciais, institucionais, turísticas e de serviços, o que resulta em elevados volumes de tráfego veicular ao longo do dia.

Em razão do significativo volume de tráfego, composto majoritariamente por veículos leves e semipesados, observou-se a ocorrência frequente de congestionamentos na interseção analisada, conforme evidenciado pelo diagnóstico apresentado na Figura 11, obtido a partir do Google Maps Trânsito (2025).

Figura 11 - Diagnóstico de Trânsito na Interseção.



Fonte: Google Maps Trânsito (2025).

A caracterização geométrica e operacional da interseção foi realizada por meio de levantamento de campo, contemplando a identificação do número e da largura das faixas de rolamento, da configuração semafórica existente, das aproximações do cruzamento e de demais elementos que influenciam o desempenho do tráfego. No que se refere às características das vias que compõem a interseção, a Avenida Nossa Senhora de Nazaré tem extensão aproximada de 1,6 km, sentido único, três faixas de rolamento ao longo da maior parte de seu traçado, com largura média de 3,0 m por faixa. Em seu trecho inicial, nas proximidades da Praça da República, na interseção com a Avenida Assis de Vasconcelos, a via mantém essa configuração, ampliando-se para quatro faixas de rolamento a partir do cruzamento com a Travessa Quintino Bocaiúva. A via cruza importantes travessas do tecido urbano central, como Dr. Moraes, Benjamin Constant, Rui Barbosa, Quintino Bocaiúva e 14 de Março, finalizando nas proximidades do Colégio Gentil Bittencourt. A velocidade regulamentada ao longo do trecho analisado é de 50 km/h, conforme sinalização vertical existente.

A Avenida Generalíssimo Deodoro possui cerca de 2,6 km de extensão, também em sentido único, sendo composta por três faixas de rolamento ao longo de seu traçado, igualmente com largura média de 3,0 m por faixa. Seu percurso tem início no bairro do Umarizal, em frente ao Instituto de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Pará, estendendo-se até a Rua Engenheiro Fernando Guilhon. A velocidade máxima regulamentada na via é de 50 km/h, compatível com a função arterial urbana que a avenida desempenha.

Para fins de registro e análise se fez levantamentos fotográficos e elaborada a planta baixa da interseção com o auxílio do software AutoCAD. A coleta dos tempos do ciclo semafórico vigente ocorreu por observação direta, com a cronometragem dos grupos semafóricos existentes. Observadores foram posicionados em pontos estratégicos para a plena visibilidade dos semáforos, utilizando cronômetros digitais para a medição dos tempos de verde, amarelo e vermelho. A partir desses dados, elaborou-se os diagramas de estágios e de intervalos luminosos da configuração atual do sistema.

Em paralelo, a coleta de dados de tráfego ocorreu por meio de contagem classificatória por tipo de veículo e movimento, conforme as diretrizes do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V (CONTRAN, 2014), no que se refere à identificação dos movimentos veiculares e sua relação com o dimensionamento semafórico. As contagens foram efetuadas em um dia útil típico, subdivididas em intervalos de 15 minutos, fornecendo os volumes necessários para a posterior aplicação dos critérios de cálculo do tempo de ciclo e distribuição de verdes efetivos.

Para a análise do tempo semafórico do cruzamento, a travessia de pedestres não foi considerada. Conforme estabelecido no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V, nas situações em que a travessia ocorre durante o estágio veicular (travessia do tipo carona), o tempo de verde destinado aos pedestres é equivalente ao tempo de verde do respectivo estágio veicular (CONTRAN, 2014).

Com base nos volumes de tráfego observados, foi proposto um novo ciclo semafórico dimensionado segundo o Método de Webster, considerando os volumes equivalentes, os movimentos críticos, os tempos de entreverdes e as condições operacionais da interseção.

Por fim, realizou-se a análise comparativa entre o ciclo semafórico vigente e o ciclo proposto, utilizando indicadores de desempenho como tempo total de ciclo, percentual de tempo verde, tempo perdido e grau de saturação.

O levantamento de dados foi realizado in loco, com o auxílio de registros fotográficos e filmagens obtidos por meio de um smartphone Xiaomi Note 13, equipado com câmera de 108 MP, conforme ilustrado na Figura 12. Para a coleta das informações, o Observador 1 foi posicionado na Avenida Generalíssimo Deodoro, registrando o fluxo veicular no sentido do bairro do Condor, enquanto o Observador 2 permaneceu na Avenida Nossa Senhora de Nazaré, monitorando o fluxo no sentido do bairro de Nazaré em direção ao bairro de São Brás, adotando-se os procedimentos técnicos de contagem, classificação veicular e consolidação horária recomendados pelo Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006).

Figura 12 - Pontos de Observação e Coleta.



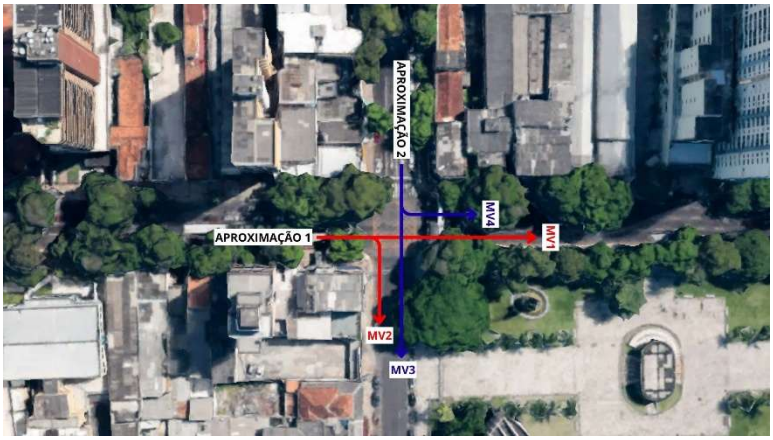
Fonte: Adaptada pelo autor com o uso do Google Earth Pro (2025).

3.2 Objeto de Estudo

A interseção em análise é composta por duas aproximações viárias, cada uma delas com duas possibilidades de movimentos veiculares, conforme ilustrado na Figura 13, totalizando quatro movimentos distintos, identificados como **MV1, MV2, MV3** e **MV4**.

O movimento veicular MV1 corresponde ao fluxo de veículos que trafegam pela Avenida Nossa Senhora de Nazaré no sentido do bairro de São Brás, enquanto o MV2 refere-se ao fluxo na mesma avenida no sentido do bairro do Condor. O MV3 representa o fluxo de veículos na Avenida Generalíssimo Deodoro em direção ao bairro do Condor e, por fim, o MV4 corresponde ao fluxo nessa via no sentido do bairro de São Brás.

Figura 13 - Aproximações e Movimentos da Interseção.



Fonte: Adaptada pelo autor com o uso do Google Earth Pro (2025).

3.3 Estrutura Semafórica

A estrutura semafórica instalada na interseção entre a Avenida Nossa Senhora de Nazaré e a Avenida Generalíssimo Deodoro é composta por três grupos semafóricos veiculares, sendo dois dispostos na posição vertical e um na posição horizontal. Todos os grupos são constituídos por três focos luminosos, verde, amarelo e vermelho, e possuem anteparo e cobre-foco, conforme os padrões normativos vigentes.

Os grupos semafóricos veiculares são sustentados por três colunas equipadas com braços projetados metálicos, distribuídas da seguinte forma: duas colunas posicionadas próximas às esquinas da Avenida Nossa Senhora de Nazaré e uma coluna localizada próxima à esquina da Avenida Generalíssimo Deodoro, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Grupos Focais.



Fonte: Autor (2025).

Além da sinalização veicular, a interseção dispõe de quatro grupos semafóricos destinados à travessia de pedestres, sendo dois instalados ao longo da Avenida Nossa Senhora de Nazaré e dois na Avenida Generalíssimo Deodoro, conforme apresentado na Figura 15. De acordo com os registros fotográficos obtidos em campo, a controladora do sistema semafórico encontra-se instalada em uma das colunas do semáforo veicular, sendo responsável pelo controle e pela execução da programação semafórica da interseção.

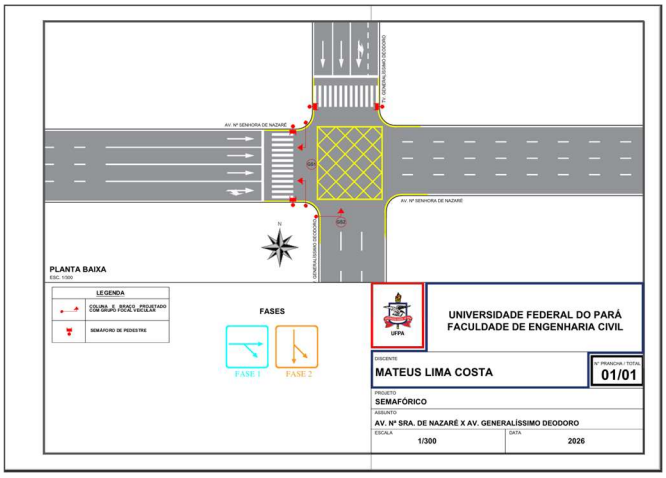
Figura 15 - Semáforo para Pedestres.



Fonte: Autor (2025).

Com base no levantamento de dados e nas imagens coletadas em campo, elaborou-se uma planta baixa da interseção (Figura 16), contendo a sinalização horizontal, vertical e semafórica existente, bem como a indicação das posições de cada equipamento. A planta foi desenvolvida por meio do software AutoCAD, da Autodesk, disponibilizado por licença institucional, o que possibilitou a integração dos dados da malha viária com as informações obtidas durante o levantamento in loco.

Figura 16 - Planta Baixa da Interseção.



Fonte: Autor (2025).

A análise da planta permitiu verificar que, na aproximação 1, existem dois semáforos sustentados por dois braços projetados, enquanto, na aproximação 2, há apenas um semáforo com um único braço projetado. Ressalta-se que não foram identificados repetidores instalados nas colunas dos grupos focais nem em outras estruturas da interseção. A controladora do sistema encontra-se localizada em uma das colunas correspondentes ao Grupo Semafórico 1 (GS1).

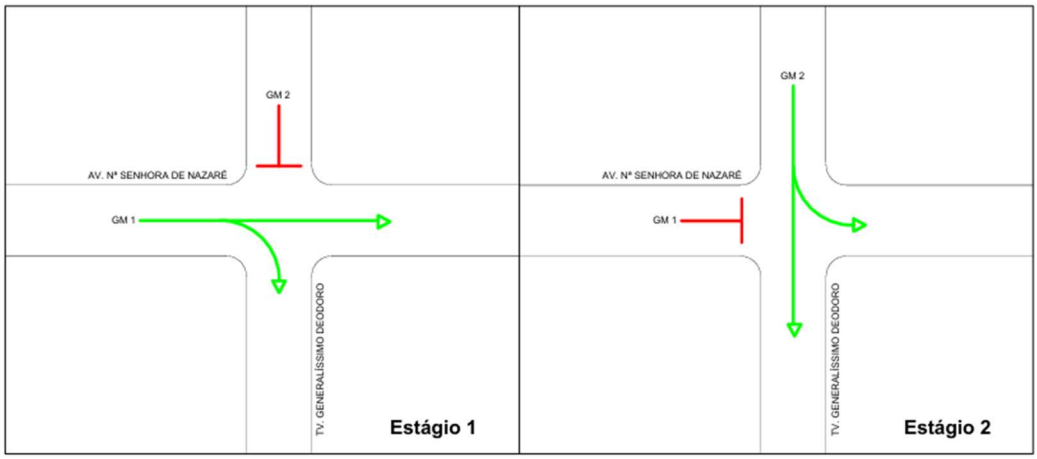
3.4 Diagrama de Estágios

A partir do levantamento e da coleta de dados em campo, realizados por meio de registros fotográficos e de vídeos, observou-se o funcionamento do sistema semafórico da interseção, o que permitiu a elaboração do diagrama de estágios apresentado na Figura 17.

Para facilitar a leitura e a interpretação do diagrama, adotou-se a seguinte nomenclatura: **Grupo de Movimentos 1 (GM1)**, correspondente à aproximação 1 e aos movimentos veiculares 1 (MV1) e 2 (MV2); e **Grupo de Movimentos 2 (GM2)**, correspondente à aproximação 2 e aos movimentos veiculares 3 (MV3) e 4 (MV4).

O diagrama de estágios permite visualizar de forma clara a alternância dos fluxos veiculares entre as duas aproximações da interseção. No **Estágio 1**, associado ao GM1, os movimentos veiculares 3 e 4 permanecem interrompidos, possibilitando a liberação simultânea dos movimentos 1 e 2. Já no **Estágio 2**, correspondente ao GM2, ocorre a interrupção dos movimentos 1 e 2, permitindo a passagem simultânea dos movimentos 3 e 4.

Figura 17 - Diagrama de Estágios da Interseção.

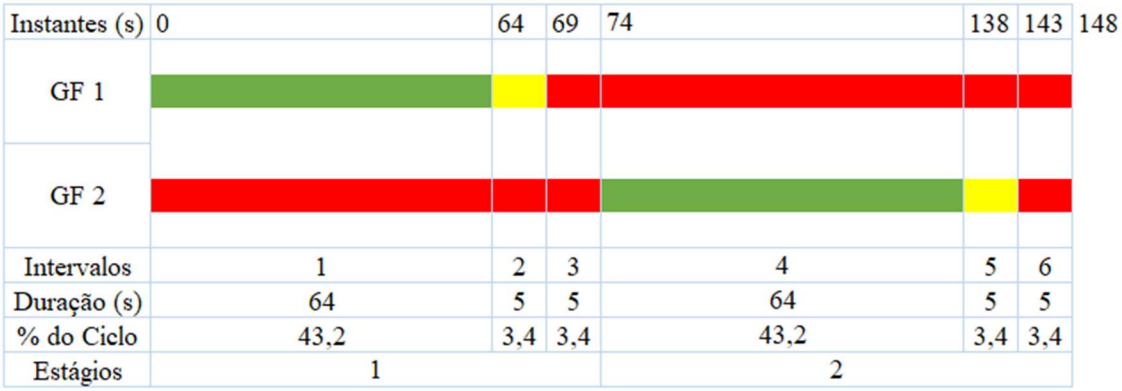


Fonte: Autor (2025).

3.5 Diagrama de Intervalos Luminosos

O diagrama de intervalos luminosos representa, por meio de barras temporais, o ciclo semafórico em operação na interseção, evidenciando os tempos atribuídos a cada estágio, bem como a duração total do ciclo. A Figura 18 apresenta o diagrama correspondente à interseção entre a Avenida Nossa Senhora de Nazaré e a Avenida Generalíssimo Deodoro, elaborado com base nas observações realizadas durante o levantamento de campo.

Figura 18 - Diagrama de intervalos luminosos atual.



Fonte: Autor (2025).

No **estágio 1**, os fluxos veiculares da Avenida Nossa Senhora de Nazaré, controlados pelo Grupo Semafórico 1, recebem indicação verde, enquanto os movimentos provenientes da Avenida Generalíssimo Deodoro, associados ao Grupo Semafórico 2, permanecem com indicação vermelha. **No estágio 2**, ocorre a alternância das indicações luminosas, de modo que os fluxos da Avenida Generalíssimo Deodoro passam a receber o sinal verde, enquanto os movimentos da Avenida Nossa Senhora de Nazaré são interrompidos.

O ciclo semafórico observado apresenta duração total de **148 segundos**. Desse período, **86,48%** correspondem ao tempo efetivo de verde, enquanto os **13,52%** restantes referem-se ao tempo perdido do ciclo. Esse tempo perdido distribui-se de forma equitativa entre os dois estágios, totalizando **10 segundos por estágio e 20 segundos ao longo de todo o ciclo semafórico**.

4. DETERMINAÇÃO DE UM NOVO CICLO SEMAFÓRICO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos dados levantados em campo, conforme metodologia descrita no Capítulo 3. Os procedimentos de organização, conversão e dimensionamento seguem os conceitos e parâmetros definidos no Capítulo 2, especialmente no item 2.4 (Dimensionamento do Semáforo), com base no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V (CONTRAN, 2014). Inicialmente, são organizados os volumes observados por movimento e por categoria veicular (item 4.1). Em seguida, os volumes são convertidos para unidade de carro de passeio (UCP) conforme item 2.4.1, viabilizando o cálculo da taxa de ocupação (Equação 2 – item 2.4.2.2), do tempo de ciclo ótimo (Equação 7 – item 2.4.2.5), do tempo de verde efetivo (Equação 8 – item 2.4.2.6.1) e, por fim, do grau de saturação (Equação 6 – item 2.4.2.4). Ao final, é realizada a comparação entre o ciclo atual e os ciclos calculado e adotado (item 4.10).

4.1 Organização dos Volumes Veiculares Observados na Hora Crítica

Os fluxos de veículos obtidos em campo foram organizados por movimento veicular (MV1 a MV4), conforme definição de movimentos e aproximações apresentada no Capítulo 3 (Figura 13). Essa organização permite estruturar os dados segundo a lógica operacional da interseção e consolidar o período de análise adotado neste estudo.

O levantamento concentrou-se no período vespertino, entre 17h30 e 18h30, definido como hora crítica de análise. Os volumes categorizados são expressos em veículos por hora e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Volume veicular observado por movimento na hora crítica.

Movimento	Automóveis	Motos	Caminhões/Ônibus	Total (veh/h)
MV1	1319	556	147	2022
MV2	235	58	23	316
MV3	1113	424	62	1599
MV4	498	116	39	653

Fonte: Autor (2025).

4.2 Conversão dos Volumes para Unidade de Carro de Passeio (UCP)

Para aplicação do dimensionamento semafórico, os volumes observados foram convertidos para Unidade de Carro de Passeio (UCP), conforme procedimento descrito no item 2.4.1 (Volume de Tráfego Equivalente).

A conversão utiliza os fatores de equivalência apresentados no referencial, tomando o automóvel como referência (fator 1,0) conforme Figura 9. A Tabela 3 apresenta os volumes convertidos para UCP/h, permitindo a comparação homogênea entre movimentos com diferentes composições veiculares.

Tabela 3 - Volume de tráfego equivalente por movimento (ucp/h).

Movimento	Auto (×1,0)	Moto (×0,33)	Pesado (×2,0)	V (ucp/h)
MV1	1319	183,5	294	1796,5
MV2	235	19,1	46	300,1
MV3	1113	139,9	124	1376,9
MV4	498	38,3	78	614,3

Fonte: Autor (2025).

4.3 Definição dos Estágios Semafóricos e Grupos de Movimentos

A interseção analisada opera com dois estágios semafóricos, definidos a partir do diagrama de estágios apresentado no Capítulo 3 (Figura 17). Para fins de dimensionamento, considera-se:

- **Estágio 1 (GM1):** Movimentos MV1 e MV2 (Avenida Nossa Senhora de Nazaré);
- **Estágio 2 (GM2):** Movimentos MV3 e MV4 (Avenida Generalíssimo Deodoro).

Conforme o item 2.3.7 (Grupo de Movimentos Críticos), o grupo crítico de cada estágio será aquele que apresentar maior taxa de ocupação (Equação 2, item 2.4.2.2). Assim, neste capítulo, após o cálculo de γ, identifica-se o grupo crítico de cada estágio para aplicação do Método de Webster (Equação 7, item 2.4.2.5).

4.4 Caracterização das Faixas Efetivas por Movimento

Embora ambas as vias possuam três faixas de rolamento, conforme caracterização geométrica descrita no Capítulo 3, a operação real indica uso efetivo diferenciado por tipo de movimento. Para que o fluxo de saturação (item 2.4.2) represente adequadamente a condição operacional dos movimentos, foram estabelecidas as faixas efetivas conforme observado:

- MV1 e MV3 (movimentos principais): **2 faixas efetivas**;
- MV2 (conversão à direita) e MV4 (conversão à esquerda): **1 faixa efetiva**.

A Tabela 4 consolida essa condição operacional.

Tabela 4 - Faixas efetivas por movimento veicular.

Movimento	Tipo de movimento	Faixas efetivas
MV1	Principal	2
MV2	Conversão à direita	1
MV3	Principal	2
MV4	Conversão à esquerda	1

Fonte: Autor (2025).

4.5 Determinação do Fluxo de Saturação dos Movimentos

O fluxo de saturação é definido no item 2.4.2 como o número máximo de veículos (ou ucp) que podem passar caso o verde permaneça continuamente por uma hora, sendo influenciado por número e largura de faixas e demais características da via. Considerando as condições geométricas descritas no Capítulo 3 (largura média de 3,0 m e configuração urbana), adotou-se como parâmetro de referência operacional o valor típico de 1.800 ucp/h por faixa efetiva, aplicado ao número de faixas efetivas definido no item 4.4. Ressalta-se que o valor de fluxo de saturação adotado corresponde a uma referência operacional compatível com vias urbanas de características geométricas semelhantes às da interseção analisada. Embora fatores como conversões, veículos pesados e interferências laterais possam influenciar esse parâmetro, adotou-se o valor de 1.800 ucp/h por faixa efetiva, amplamente utilizado em estudos de dimensionamento semafórico urbano (CONTRAN, 2014).

A Tabela 5 apresenta os valores de FS pôr movimento para uso nos cálculos subsequentes.

Tabela 5 - Fluxo de saturação por movimento (ucp/h).

Movimento	Faixas efetivas	FS (ucp/h)
MV1	2	3600
MV2	1	1800
MV3	2	3600
MV4	1	1800

Fonte: Autor (2025).

4.6 Cálculo da Taxa de Ocupação e Identificação dos Grupos Críticos

A taxa de ocupação γ é definida no item 2.4.2.2 como a relação entre a taxa de fluxo do grupo de movimentos e o fluxo de saturação, sendo calculada pela Equação 2. Neste estudo, a taxa de fluxo F corresponde ao volume equivalente em ucp/h (Tabela 3) e o fluxo de saturação FS corresponde aos valores da Tabela 5.

Assim, a taxa de ocupação foi calculada conforme a Equação 2 (item 2.4.2.2), resultando nos valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Taxa de ocupação por movimento.

Movimento	V (ucp/h)	FS (ucp/h)	y
MV1	1796,5	3600	0,499
MV2	300,1	1800	0,167
MV3	1376,9	3600	0,382
MV4	614,3	1800	0,341

Fonte: Autor (2025).

Dessa forma, os grupos críticos identificados foram:

- **Estágio 1:** MV1 (maior γ entre MV1 e MV2);
- **Estágio 2:** MV3 (maior γ entre MV3 e MV4).

A soma das taxas de ocupação dos grupos críticos resulta em:

$$\sum \gamma_i = 0{,}499 + 0{,}382 = 0{,}881$$

4.7 Cálculo do Tempo de Ciclo pelo Método de Webster

O tempo de ciclo teórico foi determinado com base no Método de Webster, conforme descrito no item 2.4.2.5 do Referencial Teórico. Esse método relaciona o tempo perdido total do ciclo e a soma das taxas de ocupação dos grupos críticos, fornecendo um valor de ciclo que minimiza o atraso médio sob condições ideais de operação.

Para a aplicação do método, adotou-se o tempo perdido total $L = 20$s, correspondente à soma dos tempos de amarelo e vermelho geral observados na programação semafórica vigente, conforme apresentado no diagrama de intervalos luminosos (Figura 18). A soma das taxas de ocupação dos grupos críticos, calculada no item 4.6, resultou em $\sum\gamma = 0{,}881$.

Assim, aplicou-se a **Equação 7**, apresentada no item 2.4.2.5 do Referencial Teórico:

$$t_{co} = \frac{1{,}5\ x\ T_p + 5}{1 - \sum y_i} \Rightarrow\ t_{co} = \frac{1{,}5\ x\ 20 + 5}{1 - 0{,}881} = 294{,}1\ s$$

O valor obtido de 294,1s do ciclo teórico indica condição de elevada saturação da interseção no período analisado.

4.8 Adoção do Ciclo Recomendado e Distribuição dos Tempos de Verde

O Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V recomenda que, em situações usuais de controle, o tempo de ciclo não ultrapasse 120 s, em razão dos tempos elevados de espera. Dessa forma, para fins de proposição e comparação operacional, adotou-se o ciclo **C = 120 s**.

O tempo de verde efetivo do estágio é calculado conforme o item 2.4.2.6.1, utilizando a **Equação 8**, considerando o tempo de ciclo adotado C, o tempo perdido total L e a taxa de ocupação do grupo crítico γ_i. Os valores obtidos para os grupos críticos de cada estágio são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Tempos de verde efetivo com ciclo de 120 s.

Grupo crítico	Estágio	tv, efet(s)
MV1	1	56,6
MV3	2	43,4

Fonte: Autor (2025).

4.9 Análise Comparativa da Capacidade e do Grau de Saturação

O grau de saturação é definido no item 2.4.2.4 e calculado pela **Equação 6**, relacionando a taxa de fluxo do grupo de movimentos e a capacidade. Para esta análise adotou-se a capacidade operacional do movimento como função do fluxo de saturação e da fração de verde efetivo no ciclo adotado (C = 120 s), permitindo avaliar se o plano proposto atende os movimentos com maior demanda.

A Tabela 8 apresenta os resultados de capacidade e o grau de saturação x para os movimentos, evidenciando os pontos críticos de operação sob o ciclo adotado.

Tabela 8 - Grau de saturação dos movimentos com ciclo de 120 s.

Grupo crítico	Capacidade (ucp/h)	x
MV1	1698	1,06
MV2	849	0,35
MV3	1302	1,06
MV4	651	0,94

Fonte: Autor (2025).

4.10 Comparação dos Ciclos Semafóricos

Com base nos resultados obtidos, elaborou-se a Tabela 9, sintetizando a comparação entre: (i) o ciclo atualmente em operação, observado em campo (Figura 18), (ii) o ciclo teórico calculado pelo Método de Webster (item 4.7) e (iii) o ciclo adotado para fins de proposta, compatível com a recomendação normativa (item 4.8).

Tabela 9 - Comparação dos tempos de ciclo.

Situação analisada	Tempo de ciclo (s)	Condição operacional
Ciclo atual	148	Acima do recomendado
Ciclo Webster	294	Elevada saturação
Ciclo adotado	120	Condição crítica nos movimentos principais

Fonte: Autor (2025).

4.10.1 Síntese Comparativa

A análise comparativa dos ciclos semafóricos considerou não apenas os valores de tempo de ciclo e de verde efetivo obtidos ao longo deste capítulo, mas também as condições operacionais observadas no entorno da interseção, as quais exercem influência direta sobre a capacidade efetiva das aproximações e sobre os níveis de saturação identificados. Dessa forma, a interpretação dos resultados apresentados nos itens 4.7, 4.8 e 4.9 deve ser feita de maneira integrada, associando os parâmetros teóricos de dimensionamento às interferências reais existentes no uso do espaço viário.

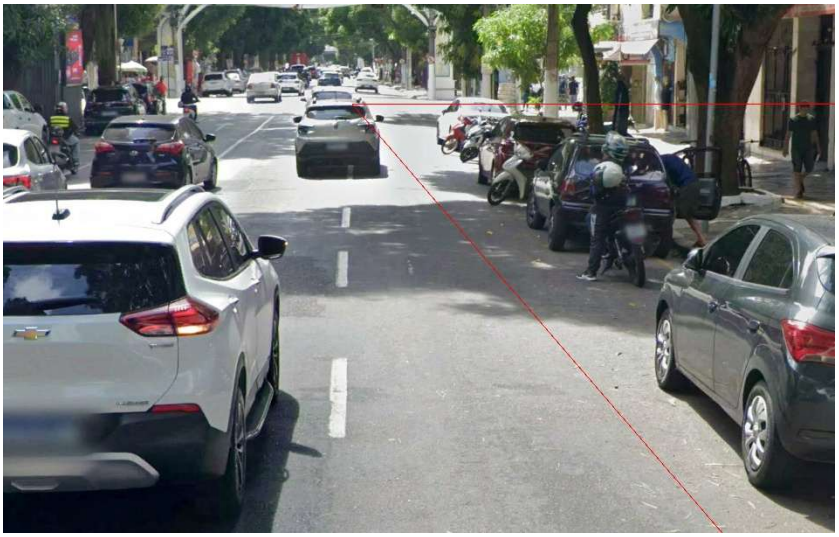
O ciclo em operação atual na interseção, observado em campo e apresentado no diagrama de intervalos luminosos (Figura 18), possui duração total de 148 s. O ciclo teórico, calculado no item 4.7 por meio do Método de Webster, resultou em um tempo de ciclo de aproximadamente 294 s, indicando condição de elevada saturação durante o período analisado.

Em função desse resultado e das recomendações do Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V, adotou-se no item 4.8 o ciclo de 120 s para fins de análise comparativa e proposição de ajustes na programação semafórica.

Entretanto, a análise do desempenho do sistema não pode ser realizada apenas a partir dos valores de tempo de ciclo e de verde efetivo. É fundamental considerar as interferências operacionais associadas ao uso do espaço viário, as quais afetam diretamente a capacidade efetiva das aproximações e contribuem para os níveis de saturação observados na análise apresentada no item 4.9.

No movimento MV2, correspondente à conversão à direita na Avenida Nossa Senhora de Nazaré, se observa a presença de estacionamentos não regulamentados ao longo da faixa destinada a esse movimento. A ocupação irregular da faixa de rolamento por veículos estacionados reduz de forma significativa a sua disponibilidade operacional, obrigando os veículos em circulação a realizar manobras de desvio, interrupções frequentes e redução de velocidade. Essa condição compromete a fluidez do movimento de conversão e, adicionalmente, interfere no escoamento do movimento principal MV1, uma vez que ambos são atendidos pelo mesmo estágio semafórico.

Figura 19 - Estacionamento Não Regulamentado na Avenida Nazaré.



Fonte: Adaptada pelo autor com o uso do Google Earth Pro (2025).

Situação semelhante, porém, de natureza distinta, é observada no movimento MV4, correspondente à conversão à esquerda na Avenida Generalíssimo Deodoro. Nesse caso, existe a presença de faixa de estacionamento regulamentada ao longo da aproximação.

Figura 20 - Estacionamento Não Regulamentado na Avenida Generalíssimo.



Fonte: Adaptada pelo autor com o uso do Google Earth Pro (2025).

Embora permitida do ponto de vista legal, essa condição também impõe restrições à capacidade efetiva do movimento, uma vez que as manobras de entrada e saída de veículos estacionados introduzem conflitos adicionais, reduzindo a eficiência da faixa destinada à conversão e afetando o desempenho do estágio que atende simultaneamente os movimentos MV3 e MV4.

Essas interferências operacionais explicam, em parte, os resultados obtidos na análise de capacidade apresentada no item 4.9, na qual os movimentos principais MV1 e MV3 apresentaram grau de saturação superior a 1,0, mesmo quando adotado o ciclo recomendado de 120 s, conforme item 4.8. Embora os movimentos de conversão não tenham se mostrado críticos do ponto de vista volumétrico, as restrições impostas pelos estacionamentos regulamentados ou não contribuem para a redução da eficiência global dos estágios, ampliando o tempo de ocupação da área de conflito e dificultando a dissipação das filas.

Dessa forma, a discrepância entre a demanda observada e o desempenho do plano semafórico em funcionamento não está associada exclusivamente ao valor do tempo de ciclo, mas também à utilização inadequada do espaço viário, que compromete a capacidade efetiva das faixas e agrava as condições de saturação nos movimentos predominantes.

O Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V ressalta que o bom funcionamento de uma programação semafórica depende da correta definição das condições operacionais do local onde será aplicada, evidenciando a importância das características do entorno na explicação dos resultados obtidos.

4.10.1.1 Comparação entre o Ciclo Atual e o Ciclo Teórico

A comparação entre o ciclo atualmente em operação e o ciclo teórico obtido pelo Método de Webster permite avaliar o grau de saturação da interseção sob a ótica do dimensionamento teórico. Conforme apresentado no item 4.7, o ciclo teórico calculado foi de aproximadamente 294 s, valor significativamente superior ao ciclo atualmente praticado, de 148 s.

Esse resultado evidencia que, para acomodar integralmente os volumes observados durante a hora crítica sem a formação de filas crescentes, seria necessário ampliar substancialmente o tempo de ciclo, de modo a aumentar o tempo de verde disponível para os movimentos críticos. Contudo, a adoção de um ciclo dessa magnitude implicaria tempos de espera excessivos para os usuários, tornando a operação semafórica incompatível com as recomendações usuais de controle urbano.

Assim, o ciclo teórico não é considerado adequado para implantação direta, sendo utilizado neste estudo como parâmetro de referência para caracterizar o nível de saturação da interseção e evidenciar as limitações da configuração atual frente à demanda observada.

4.10.1.2 Comparação entre o Ciclo Atual e o Ciclo Adotado

A comparação entre o ciclo atualmente em operação (148 s) e o ciclo adotado para fins de proposição (120 s), conforme apresentado no item 4.8, permite avaliar os efeitos da adequação do tempo de ciclo às recomendações normativas. A redução do ciclo representa uma tentativa de compatibilizar a programação semafórica com limites considerados aceitáveis para situações usuais de controle, buscando reduzir os tempos máximos de espera e melhorar a fluidez do tráfego.

Entretanto, conforme demonstrado na análise da capacidade e do grau de saturação apresentada no item 4.9, os movimentos principais da interseção, MV1 e MV3, permanecem em condição crítica durante o período de pico analisado, apresentando grau de saturação superior à unidade.

Esse comportamento indica que, embora o ciclo adotado esteja em conformidade com as recomendações normativas, sua aplicação isolada não é suficiente para eliminar completamente as restrições operacionais existentes.

Dessa forma, a comparação entre o ciclo atual e o ciclo adotado reforça que os problemas de saturação observados não decorrem exclusivamente do valor do tempo de ciclo, mas também das interferências operacionais associadas ao uso do espaço viário, discutidas no item 4.10.1. Assim, torna-se pertinente avaliar o impacto dessas interferências sobre a capacidade efetiva da interseção, especialmente no que se refere à ocupação das faixas por estacionamento ao longo das aproximações.

Com esse objetivo, foi formulada uma hipótese operacional adicional, denominada Cenário 1, na qual se considera a remoção dos estacionamentos irregulares na Avenida Nossa Senhora de Nazaré e regulamentados na Avenida Generalíssimo Deodoro durante os horários de pico. Nessa condição, admite-se que as três faixas físicas existentes em cada aproximação possam ser plenamente utilizadas para o escoamento do tráfego, conforme permitido pela sinalização horizontal vigente.

Ressalta-se que o Cenário 1 constitui uma simulação condicionada à efetiva liberação da terceira faixa como faixa de tráfego contínuo para os movimentos principais (MV1 e MV3), considerando que essa faixa não é exclusiva de conversão e permite o seguimento reto conforme indicado na planta da interseção. Pressupõe-se, ainda, a inexistência de bloqueios a jusante que comprometam a descarga dos veículos após o cruzamento, de modo que o ganho de capacidade estimado possa ser plenamente materializado.

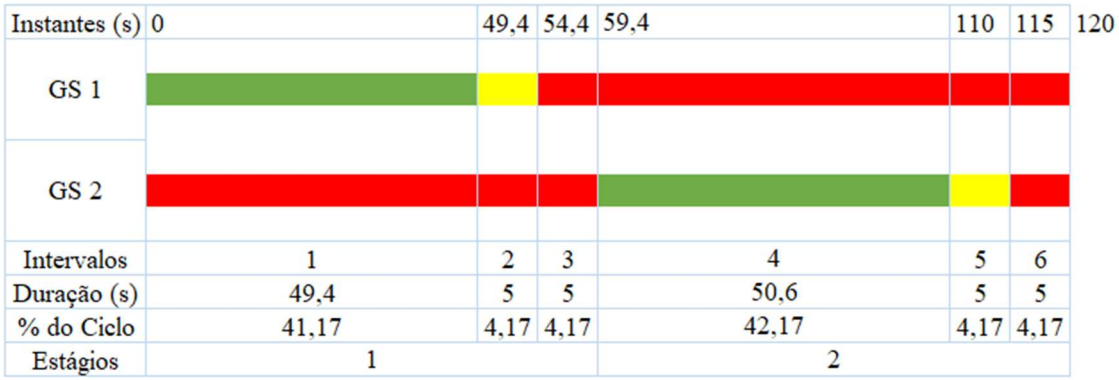
Sob essa hipótese, os movimentos principais MV1 e MV3 passam a operar com três faixas efetivas, elevando o Fluxo de Saturação (FS) de 3.600 ucp/h para 5.400 ucp/h, considerando o valor de referência de 1.800 ucp/h por faixa efetiva adotado neste estudo. Essa ampliação representa um aumento de 50% na capacidade geométrica disponível para os fluxos predominantes, reduzindo de forma significativa a pressão exercida pela demanda sobre o ciclo semafórico.

A elevação do fluxo de saturação impacta diretamente as taxas de ocupação dos grupos críticos. No Cenário 0, a soma das taxas de ocupação ($\sum\gamma$) era igual a 0,881, indicando elevada aproximação do limite de capacidade.

No Cenário 1, essa soma é reduzida para 0,674, evidenciando diminuição expressiva da demanda relativa em relação à capacidade disponível e tornando o ciclo de 120 s operacionalmente viável.

Mantendo-se o ciclo recomendado de 120 s e o tempo perdido total inalterado, a redistribuição dos tempos de verde efetivo torna-se mais equilibrada entre os estágios. No Cenário 1, o estágio da Avenida Nossa Senhora de Nazaré passa a dispor de aproximadamente 49,4 s de verde efetivo, enquanto o estágio da Avenida Generalíssimo Deodoro recebe cerca de 50,6 s. Essa redistribuição decorre da nova configuração das taxas de ocupação dos grupos críticos. A partir desses valores, foi elaborado o respectivo diagrama de intervalos luminosos, ilustrado na Figura 21, no qual as porcentagens de cada intervalo foram determinadas com base no tempo total de ciclo de 120 s. Ressalta-se que, durante os cálculos, foram mantidos os valores com precisão completa, sendo o arredondamento aplicado apenas na apresentação final dos resultados. Assim, eventuais diferenças residuais observadas decorrem exclusivamente do processo de arredondamento, não comprometendo a consistência matemática do dimensionamento.

Figura 21 - Diagrama de Intervalos Luminosos do Cenário 1 com Ciclo de 120 s.



Fonte: Autor (2025).

Com o aumento da capacidade dos movimentos principais, observa-se mudança na hierarquia dos grupos críticos do Estágio 2. Enquanto no Cenário 0 o movimento principal MV3 era o limitador do estágio, no Cenário 1 o movimento de conversão à esquerda (MV4) passa a apresentar maior taxa de ocupação relativa, assumindo a condição de grupo crítico. Ainda assim, o grau de saturação máximo reduz-se para aproximadamente $x = 0{,}81$, caracterizando operação em regime estável, com dissipação adequada das filas ao término de cada ciclo.

Comparativamente, no Cenário 0, mesmo com o ciclo ajustado para 120 s, os movimentos principais operavam com grau de saturação de aproximadamente $x = 1{,}06$, indicando condição de sobre-saturação e atraso crescente. No Cenário 1, a redução do índice crítico para $x = 0{,}81$ representa diminuição de cerca de 23,5% no nível de saturação, evidenciando a transição do regime de atraso crescente (oversaturated) para um regime estável de operação.

Os resultados da simulação indicam que a ineficiência observada na interseção não está associada exclusivamente ao dimensionamento temporal do controle semafórico, mas sobretudo à gestão do espaço viário nas aproximações. A remoção das interferências de estacionamento restabelece a capacidade geométrica originalmente prevista, permitindo que o cruzamento opere de forma estável mesmo mantendo o ciclo de 120 s recomendado pela norma. Dessa forma, confirma-se que intervenções de caráter geométrico-operacional podem ser mais eficazes do que simples ajustes nos parâmetros temporais da programação semafórica.

Tabela 10 - Comparação dos Parâmetros Operacionais entre os Cenários 0 e 1.

Parâmetro Operacional	Cenário 0 (Adotado no TCC)	Cenário 1 (Proibição de Estacionamento)	Impacto / Melhoria
Faixas Efetivas (MV1/MV3)	2 faixas	**3 faixas**	Aumento de 50% na calha viária.
Fluxo de Saturação (MV1/MV3)	3.600 ucp/h	**5.400 ucp/h**	Eliminação de gargalos laterais.
Soma das Taxas de Ocupação ($\sum y$)	0,881	**0,674**	Redução da pressão sobre o ciclo.
Tempo de Verde Efetivo (Nazaré)	56,6 s	**49,4 s**	Redistribuição mais equilibrada.
Tempo de Verde Efetivo (Gen. Deodoro)	43,4 s	**50,6 s**	Atendimento à demanda de conversão (MV4).
Grau de Saturação Crítico (x)	**1,06 (Saturado)** +1	**0,81 (Estável)**	**Redução de 23,5% no índice de saturação.**

Fonte: Autor (2025).

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa permitiu avaliar, de forma comparativa, o desempenho operacional da interseção semaforizada entre a Avenida Nossa Senhora de Nazaré e a Avenida Generalíssimo Deodoro, em Belém–PA, a partir da análise do ciclo atualmente em operação, do ciclo teórico obtido pelo Método de Webster e do ciclo adotado para fins de proposição conforme recomendações normativas.

Verificou-se que o ciclo vigente de 148 segundos se encontra acima do limite de 120 segundos recomendado pelo Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V para situações usuais de controle em interseções urbanas isoladas. Tal condição implica maiores tempos máximos de espera e reduz a eficiência perceptível do sistema, além de contrariar diretrizes técnicas consolidadas para programação semafórica.

A aplicação do Método de Webster resultou em um ciclo teórico de aproximadamente 294 segundos. Embora matematicamente consistente, esse valor revela-se operacionalmente inviável, pois implicaria tempos excessivos de retenção veicular. Esse resultado, entretanto, não deve ser interpretado como falha metodológica, mas como evidência de que a interseção opera, no período de pico analisado, sob condição de saturação severa, com elevada pressão sobre os grupos críticos.

Mesmo com a adoção do ciclo de 120 segundos para fins de análise comparativa, valor compatível com as recomendações normativa, os movimentos principais MV1 e MV3 permaneceram operando com grau de saturação superior à unidade ($x \approx 1{,}06$), caracterizando regime de sobressaturação e formação de filas crescentes ao longo dos ciclos. Tal constatação confirma que a simples adequação do tempo de ciclo, de forma isolada, não é suficiente para restabelecer condições estáveis de operação quando a capacidade efetiva das aproximações se encontra comprometida.

No que se refere aos parâmetros de segurança, os tempos de amarelo e vermelho geral observados atendem aos critérios compatíveis com a velocidade regulamentada de 50 km/h nas avenidas analisadas. O entreverdes desempenha papel essencial na desocupação segura da área de conflito, garantindo a transição adequada entre estágios semafóricos.

Não foram identificadas inconsistências nos intervalos luminosos sob o ponto de vista da segurança viária, evidenciando que a problemática observada é predominantemente de natureza operacional e não relacionada ao dimensionamento dos tempos de transição.

Os resultados obtidos permitem concluir que a ineficiência identificada na interseção não é exclusivamente semafórica, mas também espacial. A presença de estacionamento irregular ao longo da Avenida Nossa Senhora de Nazaré e de estacionamento regulamentado na Avenida Generalíssimo Deodoro reduz a capacidade efetiva das faixas de rolamento, limitando o fluxo de saturação dos movimentos principais. Ainda que os movimentos MV2 e MV4 não apresentem os maiores volumes absolutos, as interferências laterais decorrentes das manobras de estacionamento e conversão introduzem conflitos adicionais que prejudicam o escoamento global do sistema, ampliando os níveis de saturação observados.

A simulação do cenário com liberação das faixas impactadas por estacionamento demonstrou redução significativa no grau de saturação crítico, evidenciando que intervenções de caráter geométrico-operacional podem produzir efeitos mais expressivos sobre o desempenho da interseção do que ajustes exclusivamente temporais na programação semafórica. Tal constatação reforça a necessidade de abordagem integrada entre dimensionamento do controle semafórico e gestão do espaço viário.

Diante dos resultados obtidos, recomenda-se:

- a proibição de estacionamento nas aproximações do cruzamento durante os horários de pico, de modo a liberar integralmente a terceira faixa de rolamento para os movimentos principais;
- o reforço da sinalização vertical e da fiscalização voltada à coibição de paradas irregulares que afetam especialmente o movimento MV2 (conversão à direita);
- a realização de estudos futuros voltados à implantação de sistemas semafóricos atuados ou adaptativos, capazes de ajustar dinamicamente os tempos de verde em função das variações de demanda ao longo do dia, considerando as características do tráfego urbano de Belém;
- o aprofundamento de análises integradas envolvendo coordenação semafórica em corredor e avaliação micro simulada do desempenho operacional.

Conclui-se, portanto, que a interseção analisada apresenta condição crítica na hora de pico não apenas em função do tempo de ciclo adotado, mas sobretudo em razão das restrições impostas pelo uso e ocupação do espaço viário. A compatibilização entre programação semafórica, capacidade geométrica efetiva e ordenamento do entorno revela-se elemento fundamental para a melhoria da mobilidade urbana local, demonstrando que soluções sustentáveis em engenharia de tráfego exigem integração entre controle operacional e gestão do espaço público.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PARÁ. Estado e Prefeitura de Belém firmam convênio para ampliar segurança no trânsito. Agência Pará, 30 nov. 2022. Disponível em: https://agenciapara.com.br/noticia/65594/estado-e-prefeitura-de-belem-firmam-convenio-para-ampliar-seguranca-no-transito. Acesso em: 21 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 set. 1997.

BRASIL. Código de Trânsito Brasileiro. Anexo II – Sinalização de trânsito. Brasília, DF: Senado Federal, 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de projetos de interseções*. Brasília, DF: DNIT, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2006.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET-SP). *Manual semafórico*. São Paulo: CET-SP, 2021.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: volume IV – sinalização horizontal*. Brasília, DF: CONTRAN, 2022.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: volume V – sinalização semafórica*. Brasília, DF: CONTRAN, 2014.

DOL. Nazaré: de estrada a uma importante avenida. Diário Online, 19 abr. 2022. Disponível em: https://dol.com.br/noticias/para/693112/nazare-de-estrada-a-uma-importante-avenida?d=1. Acesso em: 21 jul. 2025.

GOOGLE. Google Maps. Disponível em: https://www.google.com/maps. Acesso em: 21 jul. 2025.

MELO NETO, O. de M.; SILVA, G. C. B.; ROCHA MELO, T. G. P. Melhoria no fluxo de veículos e segurança de pedestres: estudo com usuários na viabilização de semáforos próximos

à rotatória. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 4, e3029, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v9i4.3029.

PAIS, F. V. Avaliação de desempenho de tráfego urbano usando simulação: estudo de caso em Maceió/AL. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 47., 2015, Porto de Galinhas. Anais [...]. Porto de Galinhas: SOBRAPO, 2015. p. 2562–2573. Disponível em: https://www.sobrapo.org.br/anais2015/PDF/156218.pdf. Acesso em: 21 jul. 2025.

WEBSTER, F. V. *Traffic signal settings*. Road Research Technical Paper n. 39. London: Her Majesty's Stationery Office, 1958.

APÊNDICE A -PLANTA BAIXA DA INTERSEÇÃO (ESCALA AMPLIADA)

