

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Thalles Augusto Ferreira

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E  
OTIMIZAÇÃO DE CICLOS SEMAFÓRICOS – ESTUDO DE CASO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Belo Horizonte – MG

2023

Thalles Augusto Ferreira

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E  
OTIMIZAÇÃO DE CICLOS SEMAFÓRICOS – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Graduação em Engenharia de Transportes do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. MSc. Diego Camargo

Coorientadora: Prof. MSc. Juliane Érika Cavalcante Bender



## AGRADECIMENTOS

Nessa oportunidade, gostaria de agradecer a minha família por me incentivar a sonhar e lutar pelos meus objetivos. Vocês são minha base e não poderia chegar até aqui sem todo apoio recebi aos longos destes anos. Um obrigado especial a minha mãe, Cíntia Soares Gomes, exemplo de determinação e sabedoria, meu pai, Ari de Jesus Ferreira pelos conselhos diante dos desafios e minha irmã, Nathália Duarte Ferreira por mostrar diariamente que devemos mirar nos nossos objetivos e desfrutar do caminho.

Agradeço a Ellen Camargo Chaves, por ser minha companheira durante toda esta etapa, pessoa com quem compartilhei minhas frustrações, inseguranças, sonhos e conquistas. Obrigado por me ouvir e por me apoiar.

Agradeço aos meus orientadores, Juliane Érika Cavalcante Bender e Diego Camargo por todas as conversas e aconselhamentos durante o planejamento, desenvolvimento e execução deste trabalho. Vocês foram fundamentais para que eu pudesse concluir este que foi um dos maiores desafios da minha graduação.

Agradeço a instituição CEFET-MG e todos os seus profissionais pelo empenho necessário para proporcionar a nós, alunos, conhecimento gratuito e de extrema qualidade. Muitas portas se abriram ao longo deste processo por fazer parte da instituição e estar cercado por grandes incentivadores e referências, a exemplo, os professores André Leite Guerra e Agmar Bento Teodoro do Departamento de Engenharia de Transportes.

Agradeço a Engetraf Consultoria e Projetos, onde tive o prazer de trabalhar com profissionais de extrema capacidade e valores indiscutíveis. Um obrigado especial ao Davi Antônio Avelar Bretas, exemplo de pessoa, pesquisador e profissional com o qual tive o privilégio de conviver diariamente.

Por fim, agradeço a Systra Engenharia e Consultoria por disponibilizar os dados que foram utilizados no presente estudo.

FERREIRA, Thalles A. Análise Comparativa de Métodos de Dimensionamento e Otimização de Ciclos Semafóricos – Estudo de Caso. 2023 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Transportes. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2023.

## RESUMO

O controle semafórico de interseções é um dos recursos mais utilizados nos centros urbanos para melhorar a fluidez, acessibilidade e segurança nos sistemas viários. Para garantir o bom funcionamento dos semáforos é necessário que os ciclos estejam bem dimensionados e otimizados. O presente trabalho propõe uma análise comparativa da operação atual de uma interseção localizada no município de Contagem, integrante da região metropolitana de Belo Horizonte, com cenários alternativos obtidos a partir da otimização de ciclos semafóricos pelo Synchro e Método de Webster. Para tanto, foi realizada revisão bibliográfica que contemplou os principais elementos da programação semafórica, identificação de métodos computacionais para dimensionamento e otimização de ciclos, apresentação de medidas de desempenho usualmente aplicadas para análise de interseções semaforizadas, descrição acerca do uso de simuladores de tráfego e contextualização de estudos similares produzidos em diferentes países nos últimos anos. Após caracterização da área de estudo, pela descrição do sistema viário e do tráfego que utiliza a interseção foi construído e validado um modelo de microssimulação no software Transmodeler, capaz de representar com confiabilidade a situação real. Foram comparados resultados de medidas de desempenhos para cada uma das aproximações e para interseção com um todo, afim de se avaliar a aplicabilidade dos métodos de otimização de ciclo, bem como identificar aquele que apresentou melhor performance. Os resultados demonstraram que ambos os métodos obtiveram desempenhos satisfatórios, sendo que o Método de Webster conduziu para a melhor solução. Este cenário produziu ganhos percentuais superiores a 10% para o atraso médio e tempo médio parado da interseção como um todo. Por sua vez, o ciclo otimizado a partir do Synchro produziu melhoras no total e média de paradas, porém não foi capaz de reduzir o atraso médio e tempo médio parado.

**Palavras-chave:** Ciclos Semafóricos; Interseções Semaforizadas; Microssimulação; Transmodeler; Synchro; Método de Webster.

FERREIRA, Thalles A. Análise Comparativa de Métodos de Dimensionamento e Otimização de Ciclos Semafóricos – Estudo de Caso. 2023. 47 f. Undergraduate Final Report. Transportation Engineering. Federal Center for Technological Education of Minas Gerais (CEFET-MG), 2023.

## **ABSTRACT**

Traffic signal control of intersections is one of the most used resources in urban centers to improve the fluidity, accessibility and safety of road systems. To ensure the proper functioning of traffic signals it is necessary that the cycles are well sized and optimized. This paper proposes a comparative analysis of the current operation of an intersection located in the city of Contagem, part of the metropolitan region of Belo Horizonte, with alternative scenarios obtained from the optimization of traffic signal cycles by Synchro and the Webster's Method. To this end, we conducted a literature review that included the main elements of traffic signal programming, identification of computational methods for cycle design and optimization, presentation of performance measures usually applied to analyze signalized intersections, description of the use of traffic simulators, and contextualization of similar studies produced in different countries in recent years. After characterizing the study area, by describing the road system and the traffic using the intersection, a microsimulation model was built and validated using the Transmodeler software, capable of reliably representing the real situation. Performance measurement results were compared for each of the approaches and for the intersection as a whole, in order to evaluate the applicability of the cycle optimization methods, as well as to identify the one that presented the best performance. The results showed that both methods obtained satisfactory performances, with Webster's Method leading to the best solution. This scenario produced percentage gains of more than 10% for the average delay and average stopped time of the intersection as a whole. In turn, the cycle optimized from Syncho produced improvements in total and average stops, but was not able to reduce average delay and average stopped time.

**Keywords:** Signal Cycle; Signalized Intersection; Microsimulation; Transmodeler; Synchro; Webster's Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Diagrama de Estágios .....	8
Figura 2 - Variações horárias típicas .....	9
Figura 3 - Fluxo de saturação e tempos perdidos em estágio saturado .....	14
Figura 4 - Representação Entreverdes .....	14
Figura 5 - Dinâmicas e cinemáticas de uma parada veicular .....	28
Figura 6 - Classificação das simulações de tráfego .....	29
Figura 7 - Rede do estudo em Chicago – Estados Unidos (2001) .....	31
Figura 8 - Rede do estudo em Al Khobar – Arábia Saudita (2014) .....	34
Figura 9 - Rede do estudo em Belo Horizonte – Brasil (2019) .....	35
Figura 10 – 1ª Etapa do desenvolvimento do trabalho .....	37
Figura 11 - 2ª Etapa de desenvolvimento do trabalho.....	38
Figura 12 – 3ª Etapa de desenvolvimento do trabalho.....	39
Figura 13 - Local do Estudo - Interseção da Av. José Faria da Rocha com R. Itália.40	
Figura 14 - Av. José Faria da Rocha.....	41
Figura 15 - Rua Itália.....	42
Figura 16 - Rua das Mangueiras .....	42
Figura 17 - Identificação dos movimetos da interseção .....	43
Figura 18 - Composição da Frota.....	44
Figura 19 - Volume Horário (ucp).....	45
Figura 20 - Programação Semafórica Atual .....	46
Figura 21 - Configurações das vias - Synchro.....	49
Figura 22 - Configurações dos volumes - Synchro.....	50
Figura 23 - Projeção da interseção em estudo no Trasmodeler.....	53
Figura 24 - Ciclo Semafório Atual - Transmodeler .....	54
Figura 25 - Diagramas da interseção estudada.....	56

Figura 26 - Validação do modelo de simulação - Regressão Linear .....	58
Figura 27 - Ciclo semaforico otimizado - Synchro .....	60
Figura 28 – Cálculo do Fluxo de Saturação .....	61
Figura 29 – Cálculo da Taxa de Ocupação .....	61
Figura 30 - Cálculo dos entreverdes .....	61
Figura 31 - Cálculo do tempo de ciclo e verdes .....	62
Figura 32 - Ciclo semaforico otimizado - Webster.....	62
Figura 33 - Gráfico de comparação do Atraso Médio por aproximação .....	64
Figura 34 - Diferença percentual do Atraso Médio .....	65
Figura 35 - Gráfico de comparação do Total de Paradas por aproximação .....	66
Figura 36 - Gráfico da diferença percentual do Total de Paradas .....	67
Figura 37 - Gráfico de comparação da Média de Paradas por aproximação .....	68
Figura 38 - Diferença percentual da Média de Paradas .....	69
Figura 39 - Gráfico de comparação da Média de Paradas por aproximação .....	70
Figura 40 - Diferença percentual da Fila Média.....	71
Figura 41 - Diferenças percentuais dos resultados para interseção.....	72

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Fatores de Ajusto - Fluxo de Saturação .....	12
Tabela 2 - Nível de Serviço para Veículos Motorizados em interseções SemafORIZADAS .....	22
Tabela 3 - Resumo Resultados, Lawrence - Kansas .....	33
Tabela 4 - Características Geométricas da Interseção .....	47
Tabela 5 - Parâmetros de Calibração Transmodeler.....	55
Tabela 6 - Validação do modelo de simulação - GEH.....	59
Tabela 7 - Síntese dos Resultados por Aproximação .....	63
Tabela 8 - Comparação percentual do Atraso Médio por aproximação .....	65
Tabela 9 - Comparação percentual do Total de Paradas por aproximação .....	67
Tabela 10 - Comparação percentual do Média de Paradas por aproximação .....	68
Tabela 11 - Comparação percentual do Fila Média por aproximação .....	70
Tabela 12 - Síntese dos resultados para a interseção .....	71
Tabela 13 - Comparação percentual dos resultados para a interseção .....	72

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Problemas e Premissas .....	3
1.3	Objetivos .....	4
1.4	Justificativa e Motivação .....	5
1.5	Estrutura do Trabalho.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Elementos da Programação Semafórica.....	7
2.2	Métodos Computacionais.....	19
2.3	Medidas de Desempenho .....	21
2.4	Simulação de tráfego .....	29
2.5	Estudos Anteriores.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
3.1	Caracterização da Área de Estudo .....	40
3.2	Dimensionamento e Otimização do Ciclo Semafórico.....	47
3.3	Microsimulação .....	52
4	RESULTADOS.....	56
4.1	Validação do Modelo de Microsimulação .....	57
4.2	Ciclos Otimizados.....	60
4.3	Resultados por aproximação.....	63
4.4	Resultados para Interseção .....	71
5	CONCLUSÃO .....	74
6	REFERÊNCIAS.....	76
	ANEXO A.....	81

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada uma contextualização acerca dos desafios da mobilidade urbana e aplicação da sinalização semafórica como recurso para otimização da fluidez e segurança dos sistemas viários. Em sequência, são apresentados os problemas e premissas abordados no trabalho, bem como os principais objetivos que se pretende alcançar.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Mobilidade Urbana é definida como o deslocamento de pessoas e bens no espaço urbano, utilizando para isto veículos, vias e toda a infraestrutura urbana existente (BELO HORIZONTE, 2010). Diante do contínuo e acelerado crescimento dos centros urbanos a demanda por transporte aumenta a cada dia, fazendo com que o planejamento, controle e operação dos sistemas viários tornem-se fatores críticos para a garantia da mobilidade (GOMES; COSTA, 2021).

Devido às limitações impostas pela infraestrutura urbana, a otimização dos recursos disponíveis faz-se necessária para garantia da fluidez, acessibilidade e segurança do maior número de pessoas possível. Dentro dos sistemas viários, as interseções são pontos críticos, mais suscetíveis a formação de congestionamentos e ocorrência de sinistros de trânsito (FERRAZ *et al.*, 2012).

De acordo com o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2014), a sinalização semafórica tem por finalidade orientar veículos e pedestres sobre o direito de passagem em locais onde existem movimentos conflitantes. É aplicada em interseções viárias e locais de travessia de pedestres e ciclistas que demandam medidas de controle dos fluxos. A decisão de implantação de controle semafórico deve levar em consideração fatores de risco, índices de sinistros, tempos de espera e intensidade dos fluxos das aproximações (REIS; JÚNIOR, 2019).

De acordo com as necessidades e características da interseção, podem ser aplicados diferentes tipos de controle da operação semafórica. O mais comum é o controle em tempo fixo, cuja programação semafórica é definida com base em dados de tráfego capazes de caracterizar o comportamento do fluxo ao longo do dia. O plano semafórico pode apresentar ciclos distintos ao longo do dia para se adequar às

variações horárias do tráfego, todavia, segue a programação pré-definida (CONTRAN, 2014).

O controle atuado dos semáforos pode ser subdividido em dois grupos: semiatuados e totalmente atuados. O controle semiatuado mantém o fluxo da via principal liberado, até que sensores automáticos ou acionados manualmente (botoeiras), posicionados na via secundária, identifiquem a necessidade de mudança de fase. O controle totalmente atuado conta com a presença de sensores em todas as aproximações da via, e os ciclos semaforicos são ajustados automaticamente conforme o fluxo em tempo real (CONTRAN, 2014).

Além da escolha do tipo de controle semaforico deve ser levado em consideração a posição do dispositivo no sistema viário. Na condição “Controle Isolado”, a operação do dispositivo não leva em consideração os planos semaforicos de semáforos próximos. Já na condição “Controle em Rede” o planejamento do ciclo semaforico deve considerar o sincronismo com semáforos de um percurso ou área pré-estabelecida (CONTRAN, 2014).

Para que os semáforos tenham o impacto desejado no sistema viário, estes devem ter seus ciclos dimensionados de forma correta. O funcionamento inadequado destes dispositivos pode gerar aumentos no tempo de viagem e conseqüentemente elevar os custos associados ao tempo perdido, consumo de combustíveis e impactos ambientais (K ALOBAIDI, 2020). Ao longo dos anos, métodos de otimização dos ciclos semaforicos são objeto de pesquisa da comunidade acadêmica internacional (PARACHA, 1999; YANG, 2001; PARK *et al.*, 2001; PARK *et al.*, 2003; RATROUT; REZA, 2014; MAGALHÃES *et al.*, 2019).

No Brasil, a Resolução Nº 483, de 09 de abril de 2014 do CONTRAN, estabelece que os padrões a serem seguidos para implantação, programação e remoção de sinalização semaforica em vias públicas devem estar de acordo com o Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V – Sinalização Semaforica (CONTRAN, 2014). No manual são apresentadas e descritas as etapas necessárias para o dimensionamento do ciclo semaforico, sendo que, para o cálculo da maior parcela dos elementos são recomendadas equações baseadas no Método de

Webster, que apresenta limitações em situações de fluxo saturado e chegadas aleatórias.

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas a otimização dos planos semaforicos tem evoluído a partir da aplicação de recursos computacionais. Softwares como Synchro, TRANSYT e PASSER partem dos modelos matemáticos mais reconhecidos e utilizam os recursos da simulação macroscópica e determinística para otimização dos resultados (PARK *et al.*, 2003).

A condição operacional de uma interseção sinalizada por controle semaforico pode ser analisada a partir de diferentes medidas de desempenho, como exemplo o número médio de paradas, a fila máxima, atraso médio, percentual de veículos que param ao menos uma vez e percentual de ciclos saturados (FORNACIARI, 2010). De acordo com a metodologia proposta pelo *Highway Capacity Manual* (HCM) o nível de serviço de uma interseção sinalizada pode ser dado pelo atraso médio, definido como o tempo adicional de viagem experimentado pelo condutor, passageiro ou pedestre atribuído ao impacto do dispositivo de controle do fluxo no sistema viário (TRB, 2010).

A microsimulação é uma importante ferramenta de avaliação do funcionamento de uma interseção controlada por semáforo (KOONCE; RODEGERDTS, 2008). A partir deste recurso é possível extrair parâmetros de análise para diferentes cenários, e realizar a comparação dos efeitos resultantes de variações nas características geométricas do objeto de estudo, ciclos semaforicos, movimentos permitidos e comportamento dos usuários.

## **1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS**

O funcionamento inadequado dos sistemas viários resulta em uma série de impactos, como perda de tempo, aumento do consumo de combustível, degradação da qualidade do ar e aumento do número de sinistros de trânsito (RESENDE; SOUSA, 2009). A semaforização de interseções é um importante recurso para otimização da fluidez a partir do ordenamento do tráfego.

Todavia, quando utilizados de maneira inadequada, os semáforos podem causar prejuízos ao desempenho do trânsito, produzindo um efeito oposto ao desejado. Esta

má utilização pode estar associada a uma implantação não justificada ou dimensionamento incorreto das fases e ciclos semaforicos.

Assim surge o seguinte questionamento: Como ferramentas computacionais podem ser aplicadas para obtenção, otimização e análise do desempenho de ciclos semaforicos?

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 *Objetivo Geral***

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar comparativamente métodos utilizados internacionalmente para o dimensionamento de ciclos semaforicos, por meio de um estudo de caso na cidade de Contagem – MG. Os resultados obtidos serão comparados através do uso do Transmodeler, software de simulação microscópica de tráfego.

#### **1.3.2 *Objetivos Específicos***

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os objetivos específicos descritos a seguir:

- Descrever os principais elementos da programação semaforica;
- Analisar métodos de dimensionamento e otimização de ciclos semaforicos;
- Descrever as principais medidas de desempenho aplicadas na análise de interseções semaforizadas;
- Caracterizar a área de estudo;
- Obter dados subsidiários aos estudos;
- Obter planos semaforicos alternativos otimizados por meio do software Synchro e Método de Webster;
- Construir e validar a rede de microsimulação;
- Obter resultados a partir das simulações, capazes de caracterizar a operação da interseção no cenário atual e cenários alternativos;
- Comparar os resultados obtidos a fim de definir o melhor plano semaforico dentre as alternativas analisadas.

## **1.4 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO**

Atualmente no Brasil a implantação, programação e remoção de sinalização semafórica em vias públicas é regulamentada pelo Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V – Sinalização Semafórica (CONTRAN, 2014). O manual recomenda que a maior parte dos elementos que compõem os ciclos semaforicos sejam calculados por meio do Método de Webster, desenvolvido no final da década de 1950.

O presente trabalho tem como justifica produzir conhecimento a cerca de ferramentas disponíveis para o dimensionamento e otimização de ciclos semaforicos, afim de compreender a aplicabilidade e usualidade de diferentes alternativas. A partir das analises propostas, será avaliada a eficiência do Método de Webster e do Syncho, software amplamente utilizado em pesquisas e projetos da área de planejamento dos transportes.

A busca por maneiras de extrair dos sistemas viários o melhor desempenho possível, sem investimentos de ampliação de capacidade ou alteração do comportamento da demanda é a principal motivação deste estudo. Ademais, o trabalho permite conhecer etapas desempenhadas por entidades privadas e públicas no processo de identificar o melhor cenário para uma rede de transporte.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho se desenvolve em seis capítulos. No Capítulo 1 - Introdução, é apresentado e contextualizado o tema do trabalho, problema e premissas, objetivos e justificativa da pesquisa.

No Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, é apresentada toda a fundamentação teórica para desenvolvimento do projeto, bem como alguns estudos similares e relevantes utilizados como referência para estruturação do estudo.

O Capítulo 3, Materiais e Métodos, aborda o método proposto para elaboração do trabalho e obtenção dos resultados do final. Nele é apresentada a interseção analisada, os dados utilizados e descrito todo o processo para construção do modelo de simulação e obtenção dos ciclos semaforicos otimizados.

Em sequência, no Capítulo 4, Resultados, são apresentados os ciclos semaforicos resultantes dos métodos propostos bem como os resultados gerados na microssimulação de tráfego

O Capítulo 5 contém as conclusões obtidas após as análises dos resultados e também, algumas recomendações de trabalhos futuros. Por fim, no Capítulo 6 se encontram as Referências que fundamentaram os estudos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão abordados os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. A revisão da literatura foi elaborada com base nos seguintes itens: Elementos da Programação Semafórica; Métodos Computacionais; Medidas de Desempenho; Simuladores de Tráfego; Estudos Anteriores.

### **2.1 ELEMENTOS DA PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA**

Para compreender os planos semaforicos e analisar os parâmetros de desempenho de uma interseção semaforizada, é de grande importância conhecer alguns parâmetros básicos. Estes elementos são comuns para quaisquer tipos de controle semaforico e serão apresentados adiante.

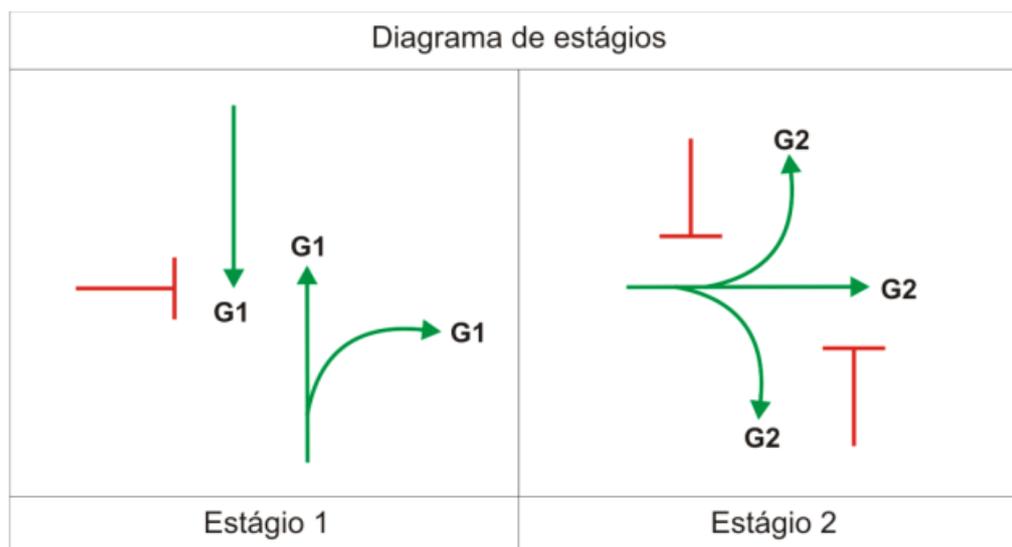
#### **2.1.1 Grupo de Movimentos**

O deslocamento de veículos ou pedestres de uma origem até um destino pode ser definido como movimento (GONZAGA, 2016). O grupo de movimentos é estabelecido pelo conjunto de movimentos permitidos durante uma fase semaforica (CONTRAN, 2014).

O planejamento das manobras permitidas em uma interseção corresponde a uma etapa preliminar ao dimensionamento dos ciclos e possui grande importância, uma vez que, determina o número de fases necessárias para atender aos veículos e pedestres que transitam no local. Os grupos devem evitar conflitos dos fluxos de tráfego e atender ao maior número de movimentos simultaneamente.

A alocação dos movimentos pode ser representada por meio dos diagramas de estágio, onde são apresentados os movimentos permitidos e proibidos para cada estágio do ciclo. Os movimentos dos pedestres são indicados apenas quando os mesmos são sinalizados por grupos semaforicos. A Figura 1 apresentada adiante corresponde a um exemplo de diagrama de estágios.

Figura 1 - Exemplo de Diagrama de Estágios



Fonte: CONTRAN (2014)

Os movimentos que possuem maior taxa de ocupação durante um estágio são chamados de Grupo de Movimentos Críticos. A taxa de ocupação está diretamente relacionada ao fluxo de tráfego e será discutido na sequência.

### 2.1.2 Fluxo de Tráfego

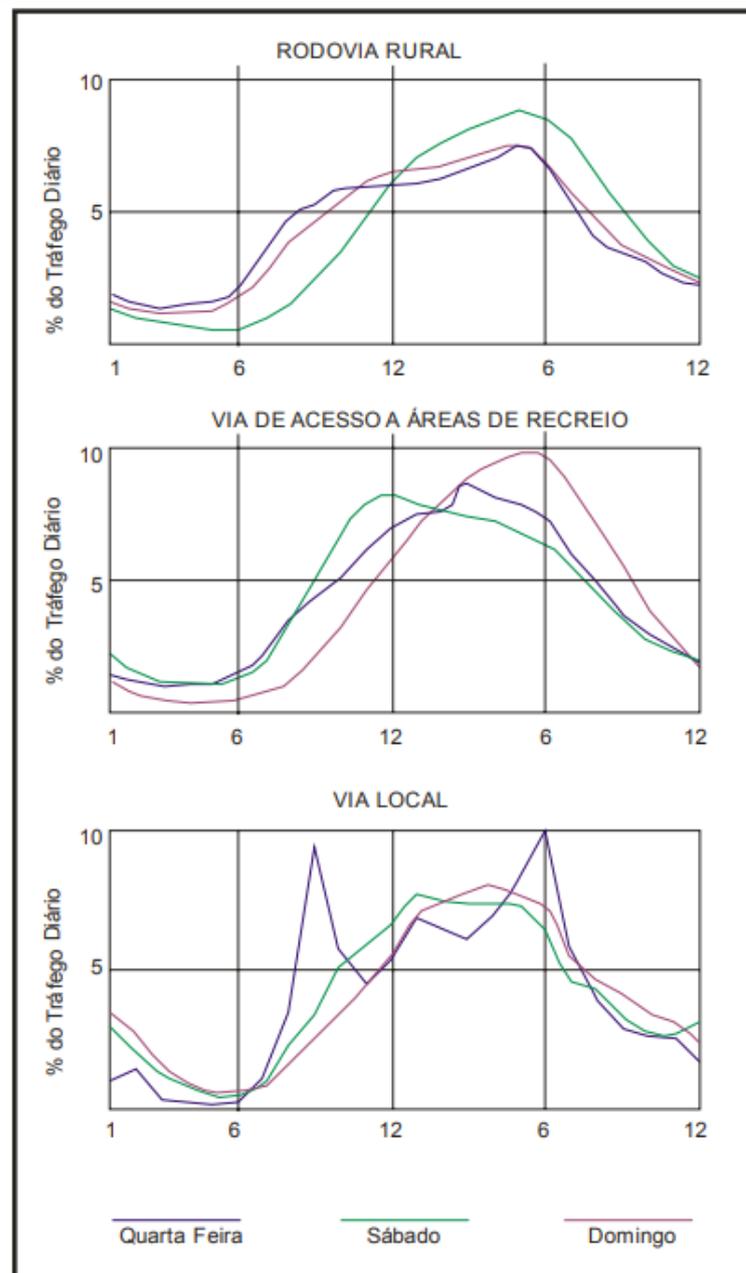
O fluxo de tráfego é determinado a partir da contagem de veículos ou pedestres que realizam um movimento durante um período de tempo. É usualmente expresso em veículos/dia (vpd) ou veículos/hora (vph) (DNIT, 2006). O tráfego é composto por diferentes classes de veículos, cada uma com características próprias que exercem diferentes impactos ao trânsito.

Para analisar comparativamente diferentes fluxos de tráfego, levando em consideração os impactos causados por tipo de veículo, são atribuídos fatores de equivalência a cada categoria. O Volume de Tráfego Equivalente corresponde a uniformização dos volumes a partir destes fatores, sendo expresso em unidades de carro de passeio (ucp).

O comportamento do fluxo de tráfego em um local é variável ao longo das horas, dias da semana e meses do ano. A variação tende a ser justificada pelas características da via, do sistema viário e do local. As horas do dia com circulação mais intensa de veículos e pedestres correspondem às horas de pico (DNIT, 2006). A Figura 2

apresentada a seguir, tem como finalidade ilustrar as variações horárias do fluxo de tráfego em vias com características distintas.

Figura 2 - Variações horárias típicas



Fonte: DNIT (2006)

A variação temporal do fluxo de tráfego é relevante para o planejamento dos ciclos semafóricos, uma vez que, a programação semafórica pode ser projetada para atender às diferentes demandas horárias e até mesmo diárias.

A Taxa de Ocupação ( $y$ ) é uma importante variável utilizada para o dimensionamento dos ciclos semaforicos, sendo determinada pela relação entre fluxo de tráfego em vph ou ucp/hora e o fluxo de saturação (KOONCE; RODEGERDTS, 2008). A Taxa de Ocupação é calculada através da Equação (1).

$$y = \frac{F}{FS} \quad (1)$$

Onde,

- $y$  – taxa de ocupação;
- $F$  – taxa de fluxo do grupo de movimentos, em vph ou ucp/hora
- $FS$  – fluxo de saturação do grupo de movimentos, em vph ou ucp/hora

### **2.1.3 Fluxo de saturação (FS)**

O Fluxo de Saturação (FS) expressa o volume máximo de veículos que é capaz de passar por uma aproximação, considerando taxa constante de escoamento, sinal aberto ao tráfego e veículos em condição de fila (FORNACIARI, 2010). Seu valor oscila entre 1600 e 2000 ucp por faixa de tráfego por hora, sendo influenciado diretamente pelas condições geométricas e estruturais da via, características do tráfego e ambiente. (CONTRAN, 2014).

Para interseções semaforizadas, o FS pode ser definido a partir do intervalo de tempo entre dois veículos após estabilização do fluxo máximo (headway de saturação). O FS é calculado através da Equação (2).

$$FS = \frac{3600}{h} \quad (2)$$

Sendo,

- $FS$  – Fluxo de Saturação (vph);
- $h$  – Headway de saturação (segundos).

Outra alternativa para se obter o fluxo de saturação de uma aproximação é utilizar o método descrito no *Highway Capacity Manual*, onde, a partir de um fluxo de saturação base são aplicados fatores de ajuste que correlacionam condições geométricas, de tráfego e de sinalização (TRB, 2000). Para tanto, faz-se uso da Equação (3).

$$FS = FSo \times N \times fw \times fHV \times fg \times fp \times fbb \times fa \times fLU \times fLT \times fRT \times fLpb \times fRp \quad (3)$$

Tal que,

- FS = fluxo de saturação para o conjunto de faixas, expresso em vph;
- FSo = fluxo de saturação básico por faixa, expresso em ucp/h/faixa;
- N = número de faixas no conjunto de faixas;
- $fw$  = fator de ajuste para largura da faixa;
- $fHV$  = fator de ajuste para presença de veículos pesados;
- $fg$  = fator de ajuste para o greide da aproximação;
- $fp$  = fator de ajuste para presença/atividade de estacionamento;
- $fbb$  = fator de ajuste para parada de ônibus junto à interseção;
- $fa$  = fator de ajuste para tipo de área onde a interseção se localiza;
- $fLU$  = fator de ajuste para utilização de faixa de trânsito;
- $fLT$  = fator de ajuste para conversões à esquerda;
- $fRT$  = fator de ajuste para conversões à direita;
- $fLpb$  = fator de ajuste para o impacto da presença de pedestres/ciclistas sobre conversões à esquerda;
- $fRpb$  = fator de ajuste para o impacto da presença de pedestres/ciclistas sobre conversões à direita.

O manual recomenda a adoção de um fluxo de saturação básico igual a 1.900 ucp/h/faixa. Um maior nível de detalhamento é obtido conforme mais fatores de ajuste são aplicados. Para simplificar o detalhamento dos fatores, foi elaborada a Tabela 1 a seguir, onde estão descritas as equações, variáveis e observações a serem consideradas em suas definições.

Tabela 1 - Fatores de Ajusto - Fluxo de Saturação

Fator	Fórmula	Variáveis	Notas
Largura da faixa	$f_w = 1 + \frac{(W - 3,6)}{9}$	W = Largura da faixa (m)	W ≥ 2,4 Se W > 4,8, deve ser considerada uma análise de 2 faixas
Veículos Pesados	$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(Et - 1)}$	%HV = % veículos pesados por grupo de faixas	Et = 2,0
Declividade	$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$	%G = % declividade no grupo da aproximação	-6 ≤ %G ≤ 10 Negativo corresponde a descida
Estacionamento	$f_g = \frac{N - 0,1 - \frac{18Nm}{3600}}{N}$	N = Número de faixas na aproximação Nm = Número de manobras de estacionamento por hora	0 ≤ Nm ≤ 180 Fp ≥ 0,050 fp = 1000 para estacionamento proibido
Bloqueio por ônibus	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14,4Nb}{3600}}{N}$	N = Número de faixas na aproximação Nb = Número de paradas de ônibus por hora	0 ≤ Nb ≤ 250 Fp ≥ 0,050
Área tipo	$f_a = 0,900$ se CBD $f_a = 1,000$ para outras áreas		
Uso da faixa	$f_{LU} = \frac{V_g}{V_{g1} \cdot N}$	Vg = taxa de fluxo da aproximação (veic/h) Vg1 = taxa de fluxo para a faixa com maior volume da aproximação N = número de faixas da aproximação	

Fonte: Adaptado de TRB (2000)

### 2.1.4 Tempo Perdido ( $T_p$ )

Após a mudança do sinal da cor vermelha para a cor verde, liberando o fluxo de veículos, os primeiros motoristas da fila levam algum tempo para reagir a alteração e iniciar o processo de aceleração. Esse tempo de reação é definido como Tempo Perdido Inicial ou Atraso Inicial. Aproximadamente após o quarto veículo da fila, o fluxo de veículos se estabiliza no que é considerado como a Taxa de Fluxo Máximo ou Taxa de Fluxo de Saturação (KOONCE; RODEGERDTS, 2008).

Também são considerados como tempos perdidos os estágios exclusivos para pedestres, quando a passagem dos veículos é completamente interrompida (CONTRAN, 2014). A Equação (4) apresentada adiante é utilizada para expressar o Tempo Perdido Total do ciclo semaforico.

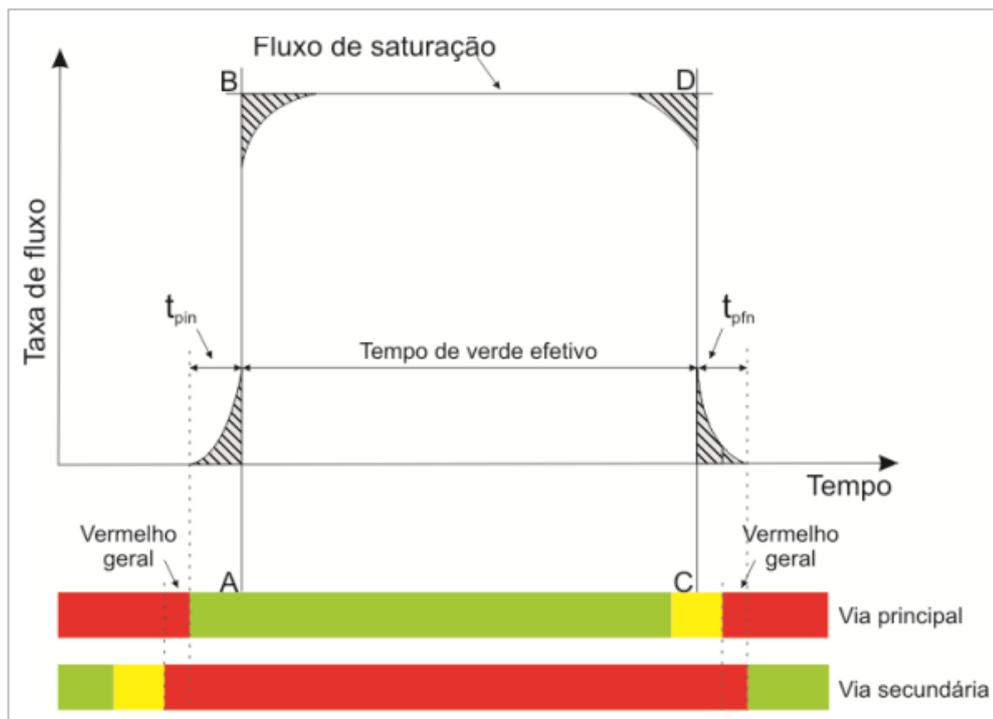
$$t_p = t_{ep} + \sum_{i=1}^n (t_{pini} + t_{pfni}) \quad (4)$$

Onde,

- $T_p$  – Tempo perdido total, em segundos;
- $t_{ep}$  – Tempo de estágio exclusivo para pedestres, em segundos;
- $N$  – Número de estágios veiculares existentes;
- $t_{pini}$  – Tempo perdido no início do estágio  $i$ , em segundos;
- $t_{pfni}$  – Tempo perdido no final do estágio  $i$ , em segundos.

A Figura 3 apresentada adiante, tem como finalidade ilustrar graficamente o comportamento da taxa de fluxo ao longo de um estágio saturado.

Figura 3 - Fluxo de saturação e tempos perdidos em estágio saturado



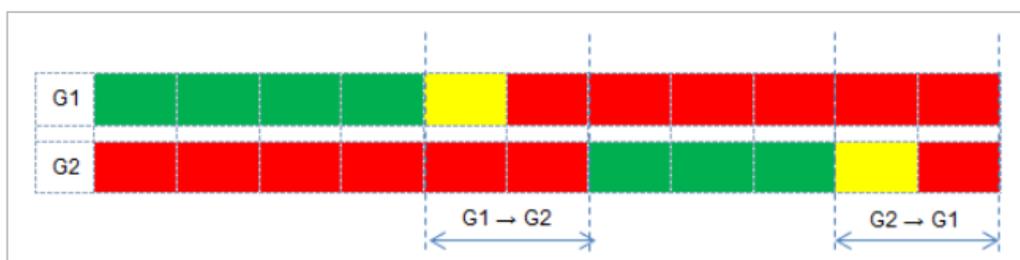
Fonte: CONTRAN (2014)

Vale mencionar que o tempo perdido final só é observado em ciclos semaforicos que estejam operando em condições saturadas, uma vez que, ele acontece quando a fila formada na aproximação não é completamente dissipada durante o tempo de verde.

### 2.1.5 Entreverdes

O período denominado Entreverdes corresponde ao intervalo entre o fim da fase verde de um estágio até o início da fase verde do estágio seguinte. É composto pelo tempo de amarelo do estágio antecedente, seguido do tempo de vermelho geral (MING, 2019). A Figura 4 apresentada a seguir, representa a definição do período de entreverdes.

Figura 4 - Representação Entreverdes



Fonte: UniCET (2019)

O tempo de amarelo tem como finalidade alertar o condutor sobre a mudança de estágio do grupo semaforico. Ele indica que o fluxo da aproximação será interrompido para liberação de outro grupo de movimentos. O dimensionamento do intervalo de amarelo é realizado com base no tempo de percepção do motorista, acrescido do tempo necessário para parar o veículo ou atravessar a interseção em segurança (KOONCE; RODEGERDTS, 2008).

A Equação (5), apresentada adiante é utilizada para determinar o tempo necessário de amarelo, para uma aproximação.

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm ig)} \quad (5)$$

Tal que,

- $t_{am}$  – tempo de amarelo (s);
- $t_{pr}$  – tempo de percepção do condutor (s);
- $v$  – velocidade do veículo (m/s)
- $a_{ad}$  – máxima taxa de frenagem admissível em via plana (m/s)
- $i$  – inclinação da via na aproximação, sendo positiva em rampas ascendentes e negativa em rampas descendentes (m/m)
- $g$  – aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>)

De acordo com CONTRAN (2014), é recomendada a utilização de  $t_{pr}$  de 1,0 s e  $a_{ad}$  de 3,0 m/s<sup>2</sup> quando o levantamento em campo destas variáveis não é viável. Estes valores foram avaliados com base em condições médias, portanto, podem não ser suficientemente representativos para situações com topografia ou composição de tráfego atípica, por exemplo.

O tempo de vermelho geral (ou tempo de limpeza) tem início após o tempo de amarelo. Corresponde ao intervalo onde todos os grupos semaforicos indicam sinal vermelho, bloqueando o fluxo em todas as aproximações da interseção. O objetivo deste intervalo é permitir que todos os veículos que entraram na interseção durante o amarelo tenham condições de concluir o movimento, antes do início da próxima fase.

A adoção do tempo de vermelho geral pode ser eficiente para redução do número de colisões e obstruções das interseções. Por outro lado, tempos de vermelho geral mal projetados aumentam o tempo de atraso das viagens e congestionamentos, especialmente durante os períodos de pico. (SOULEYRETTE *et al.*, 2004).

O dimensionamento do tempo de vermelho geral leva em consideração a geometria da interseção, o comprimento mais representativo dos veículos e a velocidade da via. A partir destas premissas, a Equação (6) descrita adiante, é utilizada para calcular o tempo de vermelho geral necessário.

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v} \quad (6)$$

Onde,

- $T_{vg}$  – tempo de vermelho geral (s);
- $d_2$  – extensão da trajetória do veículo entre a linha de retenção e o término da área de conflito (m)
- $c$  – comprimento do veículo (m)
- $v$  – velocidade do veículo (m/s)

De acordo com CONTRAN (2014), para locais onde o fluxo é predominantemente composto por veículos de passeio, recomenda-se comprimento do veículo ( $c$ ) igual a 5,00 m.

Por fim, o tempo de entreverdes ( $t_{entr}$ ) é calculado pela soma das parcelas de amarelo e vermelho geral, conforme expresso na Equação (7) abaixo.

$$t_{ent} = t_{am} + t_{vg} \quad (7)$$

### **2.1.6 Tempo de Verde Real e Efetivo**

O Tempo de Verde Real corresponde ao intervalo de tempo em que uma aproximação recebe sinal verde. Tem início após o fim do período de entreverdes e encerra quando o controle da aproximação muda para o sinal amarelo.

O Tempo de Verde Efetivo é a parcela do Tempo de Verde Real efetivamente utilizada pelo grupo de movimentos da aproximação, sendo desconsiderados os tempos perdidos decorrentes da reação e aceleração dos primeiros veículos e desaceleração dos últimos veículos no final do estágio. Desta forma, o Tempo de Verde Efetivo é aplicado apenas para interseções com operação saturada. (CONTRAN, 2014).

O dimensionamento do tempo de verde efetivo pode ser feito a partir do Método do grau de saturação máximo, ou pelo método de Webster. A distribuição dos tempos de verde efetivo pelo método de Webster é feito por meio da Equação (8).

$$t_{v,efet,i} = (t_c - T_p) \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (8)$$

Sendo,

- $t_{v,efet,i}$  – tempo de verde efetivo do estágio  $i$  (s)
- $t_c$  – tempo de ciclo (s)
- $T_p$  – tempo perdido total (s)
- $y_i$  - taxa de ocupação do grupo de movimentos críticos do estágio  $i$
- $n$  – número de estágios

O tempo de verde real, definido a partir do tempo de verde efetivo, é expresso pela Equação (9) adiante.

$$t_{v,real} = t_{v,efet,i} - t_{ent} + t_{pin} + t_{pfn} \quad (9)$$

Onde,

- $t_{v,real}$  – tempo de verde real (s)
- $t_{v,efet,i}$  – tempo de verde efetivo do estágio  $i$  (s)
- $t_{ent}$  – tempo de entreverdes (s)
- $t_{pin}$  – tempo perdido no início (s)
- $t_{pfn}$  – tempo perdido no final (s)

### 2.1.7 Tempo de Ciclo

O ciclo ótimo é aquele que resultará no tempo mínimo de atraso total para as aproximações da interseção. Ciclos muito longos resultam em tempos de espera elevados, por outro lado, ciclos muito curtos resultam em redução no tempo de verde efetivo, uma vez que os tempos de entreverdes aumentam de frequência ao longo de um período de tempo.

De acordo com CONTRAN (2014), o tempo de ciclo não deve superar 120 segundos, exceto em situações excepcionais de fluxo ou configuração geométrica da interseção.

Na década de 1950, Webster conduziu uma série de experimentos com base em interseções isoladas e com controle de tempo fixo. A partir destes estudos foram elaborados métodos utilizados até os dias de hoje para o dimensionamento do ciclo semafórico ótimo e determinação das fases críticas (CHENG *et al.*, 2003).

A Equação (10) é utilizada para determinar o tempo de ciclo ótimo a partir do Método de Webster.

$$t_{co} = \frac{1,5 T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (10)$$

Sendo que,

- $t_{co}$  – tempo de ciclo ótimo (s);
- $T_p$  – tempo perdido total (s);
- $y_i$  – taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio  $i$ ; e,
- $n$  – número de estágios.

A equação proposta por Webster para determinação do ciclo ótimo leva em consideração chegadas aleatórias dos veículos nas aproximações. Por esta razão, tem sua eficiência reduzida quando a interseção opera com alto grau de saturação. Ademais, não é utilizada para outros tipos de controle semafórico, como semi-atuado ou atuado (AKGÜNGÖR, 2018).

## 2.2 MÉTODOS COMPUTACIONAIS

Diante da necessidade de otimização dos ciclos e coordenação de grupos semaforicos, diferentes métodos vêm sendo desenvolvidos ao longo das últimas décadas para tornar as soluções propostas mais precisas. Estes métodos partem de modelos matemáticos e utilizam recursos computacionais para garantir precisão e eficiência.

Os primeiros métodos propostos partiram de modelos matemáticos determinísticos para otimização do ciclo semaforico, a fim de obter os melhores resultados para medidas de desempenho específicas. São exemplos de medidas de desempenho analisadas o tempo de atraso dos veículos, tempo de viagem e número de paradas (LU *et al.*, 2014).

Modelos determinísticos são algoritmos que a partir de parâmetros pré-estabelecidos resultarão sempre no mesmo resultado. Por esta razão, apresentam limitações para lidar com a variação dos fluxos de tráfego ao longo do tempo (GONZAGA, 2016). Tais variações ocorrem devido ao comportamento dos usuários do sistema e diferentes características apresentadas pelas classes de veículo.

Com os avanços da tecnologia computacional, a aplicação da simulação microscópica torna possível a análise dos ciclos semaforicos a partir de modelos estocásticos. De acordo com estudo desenvolvido por Park *et al.* (2003) o planejamento de ciclos semaforicos a partir de modelos estocásticos e de microssimulação produzem resultados melhores que aqueles produzidos a partir de modelos determinísticos e de macrossimulação.

Modelos estocásticos utilizam um conjunto de variáveis aleatórias, baseadas em teorias probabilísticas. A partir destes modelos, um mesmo conjunto de parâmetros é capaz de gerar diferentes resultados. Desta forma, utilizando um modelo de simulação com os parâmetros ajustados ao objeto de estudo, os resultados produzidos se aproximam melhor da realidade do trânsito (PARK *et al.*, 2001).

Dentre as diferentes ferramentas computacionais desenvolvidas para o dimensionamento e análise dos ciclos semaforicos, os mais populares são TRANSYT

(BINNING *et al.*, 2019) Syncho (HUSH *et al.*, 2006) e PASSER (VENGLAR *et al.*, 1998). Estes serão brevemente apresentados nos tópicos adiante.

### **2.2.1 TRANSYT**

TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*) foi originalmente desenvolvido no Reino Unido pelo *Transport and Road Research Laboratory*. Utiliza de modelos macroscópicos, determinísticos e de simulação para estudo e especificação do ciclo ótimo de interseções isoladas ou em rede para volumes de tráfego conhecidos (BINNING *et al.*, 2019).

O processo de otimização do TRANSYT tem como objetivo a redução de filas e atrasos. Para tanto, o software atribui um custo aos congestionamentos e os ciclos semaforicos são ajustados de forma a se obter o melhor resultado (BINNING *et al.*, 2019).

Uma das técnicas utilizadas pelo software para atingir o objetivo da otimização é denominada *Hill-climbing*. O programa parte de uma solução arbitrária e executa uma série de iterações a partir de pequenas alterações das variáveis a fim de produzir resultados melhores que os anteriores (YANG, 2001).

### **2.2.2 Synchro**

Synchro Studio foi desenvolvido pela empresa estadunidense Trafficware. Assim como o TRANSYT, utiliza de modelos macroscópicos, determinísticos e de simulação para estudo e especificação do ciclo ótimo de interseções isoladas ou em rede.

O programa parte do Método de Webster para definição do ciclo ótimo e tempos de verde. Na sequência são analisados diferentes cenários a fim de obter os menores atrasos e números de paradas. Os atrasos são calculados a partir da metodologia apresentada no HCM (2010) para interseções semaforizadas (HUSH *et al.*, 2006).

De acordo com Zhang e Xie (2006) e posteriormente Ratrou e Reza (2014) dentre as vantagens do Synchro destaca-se a usabilidade amigável ao usuário, facilitando análises e ajustes através de seus menus de ferramentas. Ademais, os arquivos

gerados pelo software são compatíveis com outros programas, simplificando a importação da programação semafórica em estudo.

### **2.2.3 PASSER**

PASSER foi desenvolvido pelo *Texas Department of Transportation*, em cooperação com a *Federal Highway Administration*. Tem como finalidade otimizar os ciclos semafóricos de uma interseção isolada ou uma rede. Para tanto utiliza métodos de simulação macroscópica e determinística (VENGLAR *et al.*, 1998).

Assim como Synchro, o PASSER utiliza os conceitos descritos pelas equações de Webster para determinar o tempo do ciclo. Assim como TRANSYT, o programa utiliza o método de *Hill-climbing* para promover iterações a fim de reduzir o atraso em cada uma das interseções (KOONCE; RODEGERDTS, 2008).

A principal diferença do PASSER para os demais softwares está na priorização em maximizar o tempo de verde e progressão de velocidade da via em análise. Consequentemente, tende a indicar tempos de ciclos mais longos (ZHANG; XIE, 2006).

## **2.3 MEDIDAS DE DESEMPENHO**

As medidas de desempenho são utilizadas para caracterizar a performance de um sistema viário. Para interseções semaforizadas, o atraso por pessoa ou veículo, número de paradas, tempo de viagem, tamanho da fila, velocidade média, consumo de combustível e emissão de poluentes são exemplos de parâmetros comumente aplicados (CONTRAN, 2014).

Alguns softwares, como o TRANSYT apresentado anteriormente, utilizam Índices de Performance obtidos a partir da combinação matemática de diferentes parâmetros. O processo de otimização dos resultados se dá a partir dos melhoramentos destes índices, e não dos parâmetros individuais.

### **2.3.1 Atraso médio**

O atraso médio, conforme definido por TRB (2010), corresponde ao tempo adicional de viagem experimentado pelo condutor, passageiro ou pedestre atribuído ao impacto

do dispositivo de controle do fluxo. Está diretamente relacionado com a sensação de desconforto do condutor e consumo de combustível.

A partir do dimensionamento do atraso, é possível determinar a condição operacional de uma interseção ou aproximação. A caracterização da condição operacional é descrita pelo *Highway Capacity Manual* (TRB, 2010) a partir de diferentes categorias, denominadas Níveis de Serviço, conforme Tabela 2 apresentada adiante.

Tabela 2 - Nível de Serviço para Veículos Motorizados em interseções Semaforizadas

Nível de Serviço	Atraso médio (segundos por veículo)
A	$\leq 10$
B	$> 10 - 20$
C	$> 20 - 35$
D	$> 35 - 55$
E	$> 55 - 80$
F	$> 80$

Fonte: Adaptado de TRB (2010)

Atrasos médios inferiores a 10 segundos por veículo indicam Nível de Serviço “A”, melhor condição operacional possível. Nesta situação, a maioria dos veículos passa pela interseção ou aproximação durante a fase verde, sem realizar parada. Esta condição é favorável para tempos de ciclo curtos.

A categoria de Nível de Serviço “B”, corresponde a atrasos médios entre 10 e 20 segundos por veículo. Nesta situação, mais veículos realizam paradas que no Nível de Serviço “A”, todavia, as condições operacionais seguem favoráveis a tempos de ciclos curtos.

Atrasos médios entre 20 e 35 segundos por veículo são classificados como Nível de Serviço “C”. Esta condição indica uma quantidade significativa de paradas durante o ciclo semaforico, contudo, muitos veículos ainda passam pela interseção sem interrupção.

O Nível de Serviço “D” indica condição operacional em que a maior parcela dos veículos realiza paradas na interseção. São demandados ciclos semafóricos maiores para atender às filas de veículos formadas. Corresponde aos atrasos médios entre 35 e 55 segundos por veículo.

A categoria de Nível de Serviço “E”, corresponde a atrasos médios entre 55 e 80 segundos por veículo. Nesta situação a condição operacional se encontra bastante prejudicada. São necessários longos ciclos e a interseção já não atende satisfatoriamente à demanda.

Por fim, o Nível de Serviço “F” corresponde a condição operacional mais crítica dentre as apresentadas. Os atrasos médios são superiores a 80 segundos por veículo e os ciclos são insuficientes para dissipar toda a fila, desta forma, parte do fluxo realiza mais de uma parada antes de passar pela interseção. É possível que a coordenação semafórica seja prejudicada por interseções operando nesta condição.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos diferentes métodos para calcular o atraso em interseções semaforizadas. São exemplos Webster (1958), Miller (1968), Newell (1965), Van As (1990) e Fambro *et al.* (1997).

A equação de Webster para cálculo do atraso é baseada no modelo de chegadas de Poisson, sendo amplamente utilizado. O primeiro termo da equação define o atraso das chegadas, considerando fluxo de tráfego regular e constante. O segundo termo, representa o atraso provocado pela situação de saturação. Por fim, o terceiro termo corresponde ao fator de ajuste da equação (BARUA; MAMUN, 2017).

O CONTRAN (2014) indica a aplicação da equação de Webster para cálculo do atraso médio dos veículos em condições não congestionadas e sem a influência de sinalizações semafóricas antecedentes que alterem o comportamento de chegada dos veículos à interseção.

$$a_{u+al} = \frac{t_c(1-p)^2}{2(1-px)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left( \frac{t_c}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2+5p)} \quad (11)$$

Sendo,

- $a_{u+al}$  = Atraso médio dos veículos (segundos)
- $t_c$  = Tempo de ciclo (segundos)
- $p$  = fração de verde (relação entre o tempo de verde efetivo e o tempo de ciclo)
- $q$  = taxa de fluxo (vpc por segundo ou ucp por segundo)
- $x$  = grau de saturação

Vale destacar que ferramentas de microssimulação são capazes de calcular o tempo de atraso médio nas interseções semaforizadas com mais precisão. Uma vez que, utilizam de modelos estocásticos e levam em consideração parâmetros de comportamento dos usuários pré-estabelecidos (CHENG *et al.*, 2016).

### **2.3.2 Número de paradas**

O número de paradas pode ser analisado de diferentes maneiras, como, número total de paradas, número médio de paradas por ciclo, ou percentual de veículos que param em uma interseção semaforizada (CONTRAN, 2014).

Esta medida de desempenho tem sido objeto de estudo de diversas pesquisas ao longo dos anos. Dentre as primeiras contribuições para estimar o número de paradas em uma interseção está Webster (1958) que relacionou o número de paradas com o atraso para uma interseção isolada, em condições de fluxo uniforme e faixa única.

Posteriormente, Webster e Cobbe (1966) desenvolveram uma formulação matemática para estimar o número de veículos que realizam paradas em uma interseção não saturada, considerando chegadas aleatórias dos veículos. Dando sequência aos estudos, Catling (1977) adaptou as equações para que estas pudessem ser aplicadas tanto para condições de tráfego não saturado, quanto para saturado.

Council (1983) acrescentou a discussão a perspectiva de distribuição geométrica dos veículos que estão em fila, no início do ciclo semaforico. Estudos mais recentes, como Rakha *et al.* (2001) desenvolveram modelos de estimativa no número de paradas a partir de modelos de simulação microscópica.

A Equação (12) a seguir, recomendada pelo CONTRAN (2014), tem como referência o modelo proposto por Webster, sendo indicada para condições de fluxo não saturado, com chegada e partida constantes.

$$n_p = \frac{F \cdot FS}{FS - F} \left( \frac{t_c - t_{v,efet}}{3600} \right) \quad (12)$$

Tal que,

- $N_p$  = número de veículos, ou ucp que realizam paradas por ciclo
- $F$  = taxa de fluxo (vph ou ucp/h)
- $FS$  = fluxo de saturação (vph ou ucp/h)
- $t_c$  = tempo de ciclo
- $t_{v,efet}$  = tempo de verde efetivo

O número de paradas representa grande impacto na emissão de poluentes e consumo de combustíveis. Isto ocorre devido a aceleração necessária para retomada do movimento, bem como o período em que o veículo está em funcionamento parado, aguardando pela liberação do fluxo (KONCE; RODEGERDTS, 2008).

### **2.3.3 Tamanho da Fila**

O tamanho da fila corresponde a quantidade de veículos aguardando no fim do período de interrupção do fluxo de uma aproximação. Esta é uma importante medida de desempenho que pode ser aferida diretamente em campo a partir da média do número de veículos em fila nos ciclos de um período pré-estabelecido. (CONTRAN, 2014).

Ao longo dos anos, foram realizadas diversas pesquisas com o objetivo de criar modelos para estimar o tamanho das filas em interseções semaforizadas. Foram então desenvolvidos dois métodos. O primeiro deles, proposto por Webster (1958) e complementado por diversas pesquisas futuras (NEWELL, 1965; ROBERTSON, 1969; GAZIS, 1974; MAY, 1975; CATLING, 1977; AKCELIK, 1999; STRONG *et al.*, 2006; SHARMA *et al.*, 2007; VIGOS *et al.*, 2008) é baseado em análises acumulativas de entradas e saídas de uma aproximação da interseção.

O método proposto por Webster apresenta limitações para obtenção da distribuição espacial da fila. O segundo método, proposto por Lighthill e Whitham (1955) e adaptado para atender à interseções semaforizadas por Stephanopolos e Michalopoulos (1979, 1981) estima o comprimento das filas a partir da trajetória dos veículos baseado em modelos de comportamento no encontro de ondas de tráfego.

O segundo método apresenta limitações de aplicação prática, uma vez que demandam parâmetros de entrada com alto nível de precisão para produzir resultados satisfatórios (LIU *et al.*, 2009). O método indicado por CONTRAN (2014), tem como referência o modelo proposto por Webster (1958) e é definido pela Equação (13) apresentada adiante.

$$f_{max} = F \left( \frac{t_c - t_{v,efet}}{3600} \right) \quad (13)$$

Tal que,

- $f_{max}$  = fila máxima (vph ou ucp/h)
- $F$  = Taxa de fluxo (vph ou ucp/h)
- $t_c$  = tempo de ciclo
- $t_{v,efet}$  = tempo de verde efetivo

A partir do cálculo da fila máxima, é possível estimar o tempo necessário para dissipação da mesma. A Equação (14) utilizada é apresentada a seguir.

$$t_d = \frac{F}{FS - F} (t_c - t_{v,efet}) \quad (14)$$

Onde,

- $T_d$  = tempo necessário para dissipar a fila (segundos)
- $FS$  = Fluxo de saturação (vph ou ucp/h)

Assim como nas medidas de desempenho apresentadas anteriormente, a avaliação do tamanho das filas, em números de veículos e especialmente pode ser simplificado pelo uso de ferramentas de simulação microscópica.

### **2.3.4 Consumo de Combustível e Emissão de poluentes**

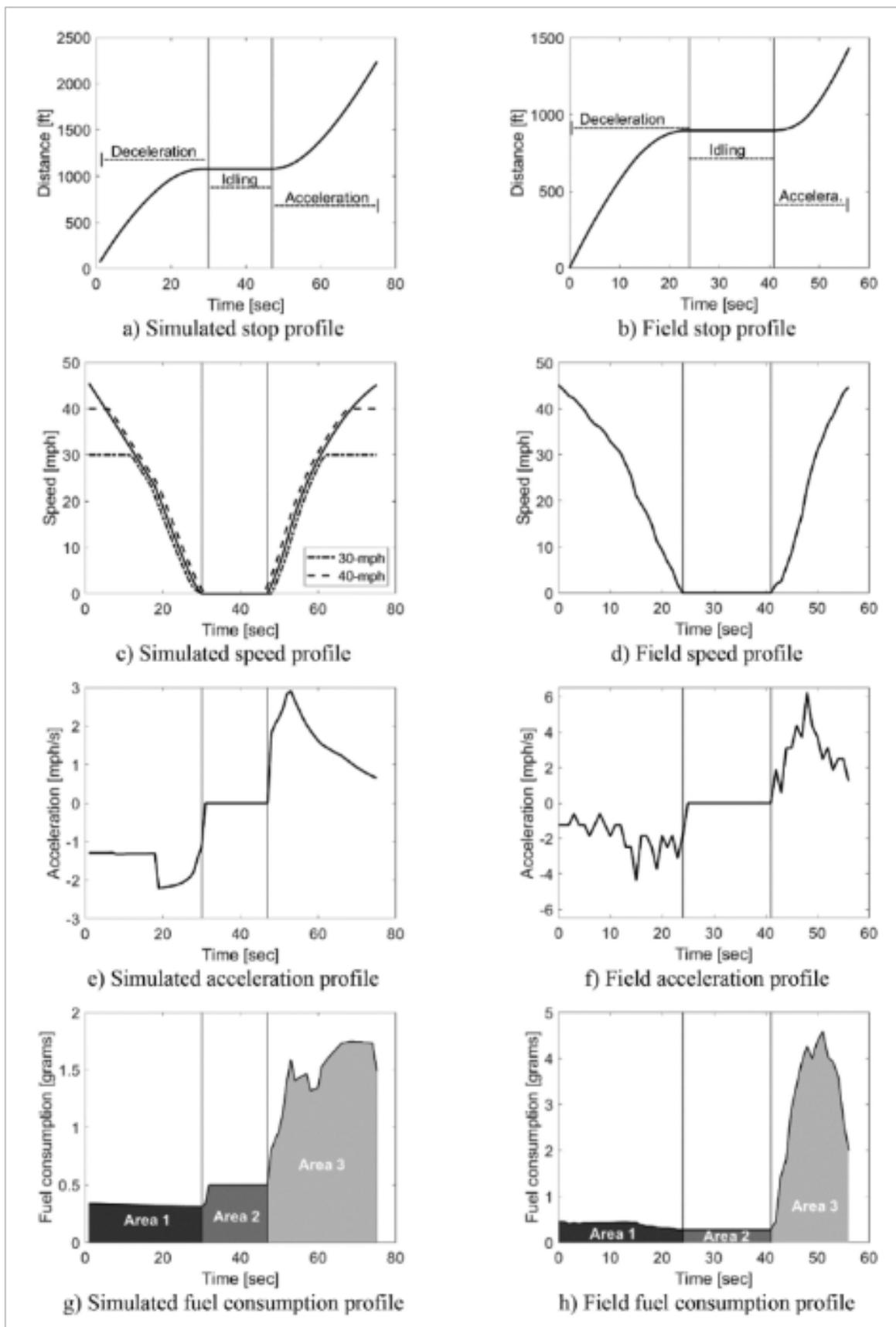
As condições de fila e movimentos de parada e aceleração, tornam as interseções dos sistemas viários urbanos pontos críticos de consumo de combustível e emissão de poluentes como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (ALSHAYEB *et al.*, 2021). Diante dos desafios globais de enfrentamento do aquecimento global e aproveitamento sustentável dos recursos, estes parâmetros ganham relevância como medidas de desempenho.

Desde a crise do petróleo da década de 1970, diversas pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de relacionar o consumo de combustível e emissão de poluentes com atraso, número de paradas e tamanho do ciclo semafórico. Os resultados obtidos demonstraram que a redução no atraso, nem sempre está associada a reduções de consumo, uma vez que, o número de paradas pode ser maior (BAUER, 1975; COURAGE; PARAPAR, 1975; HURLEY; BALL, 1979).

Posteriormente, estudos como Villalobos (2001), Kwak *et al.* (2012), Liao (2013) e Zhao *et al.* (2018) propuseram modelos de otimização dos planos semafóricos equilibrando o número de paradas e atraso, com o consumo e emissão de poluentes. Para tanto, é criado um Índice de Performance, resultante a partir da combinação das variáveis descritas anteriormente, com diferentes pesos associados a cada uma delas.

A Figura 5 apresentada adiante, ilustra o comportamento dos veículos durante os movimentos de parada e retomada da velocidade de fluxo em uma interseção semaforizada. A coluna de gráficos à esquerda corresponde aos valores obtidos a partir de simulação, enquanto os gráficos a direita retratam resultados de campo.

Figura 5 - Dinâmicas e cinemáticas de uma parada veicular

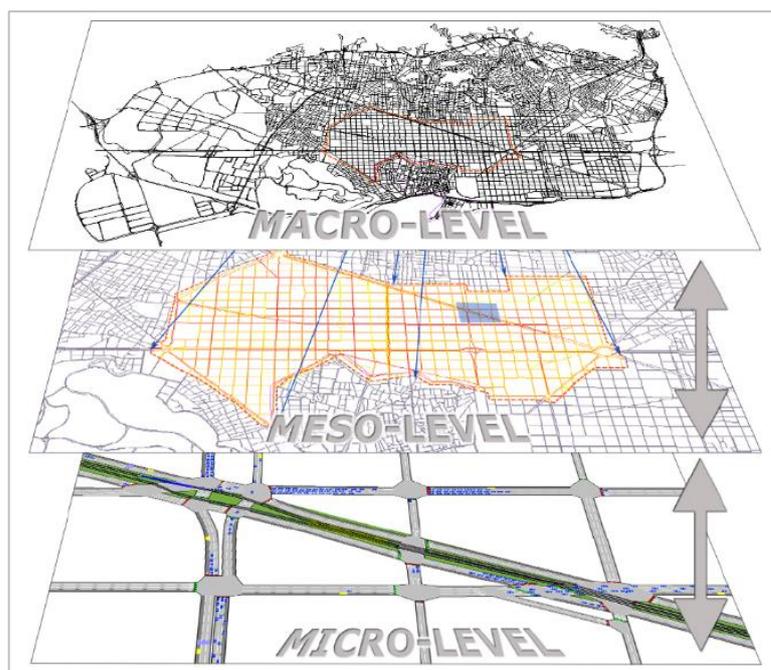
Fonte: ALSHAYEB *et al.* (2021)

## 2.4 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

As simulações de tráfego são utilizadas para reproduzir computacionalmente o comportamento de sistemas viários e obter parâmetros de avaliação do desempenho. Os softwares de simulação são construídos a partir de modelos matemáticos que utilizam os principais fundamentos do tráfego, como fluxo, velocidade, e densidade para estimar a capacidade de uma rede e medir a performance do sistema (JONES, 2004).

Os softwares de simulação de tráfego podem ser agrupados de acordo com suas áreas de aplicação, sendo classificados como modelos microscópicos, mesoscópicos ou macroscópicos (AZLAN; ROHANI, 2018). A Figura 6 apresentada adiante, representa diferentes aplicações dos modelos de simulação.

Figura 6 - Classificação das simulações de tráfego



Fonte: Barceló *et al.* (2005)

Na simulação microscópica (microsimulação) cada viagem é representada individualmente. Para cada veículo que entra na rede de simulação é atribuída uma categoria (por exemplo: passeio, coletivo e carga) e as características de performance correspondentes (tamanho, peso, aceleração, desaceleração, velocidade e outros). Também são atribuídas características que descrevem o comportamento dos motoristas como agressividade e tempo de reação (JONES, 2004).

Ademais, durante a construção da rede de simulação microscópica são definidas as propriedades geométricas e operacionais das vias, bem como os dispositivos de controle de tráfego. As características dos veículos e condutores podem ser modificadas para refletir com maior precisão as condições do cenário estudado.

Os movimentos dos veículos ao longo da rede são baseados, principalmente, em três modelos: *Car Following*, *Lane Changing* e *Gap Acceptance*. Os modelos de *Car Following* descrevem como um veículo seguirá outro com velocidade inferior, determinando por exemplo, a distância entre os veículos para diferentes graus de agressividade dos condutores (AZLAN; ROHANI, 2018).

Os algoritmos de *Lane Changing* descrevem como serão tomadas as decisões de mudança de faixa de acordo com as características dos veículos e condutores. As mudanças de faixa acontecem em diversas situações, como o início ou fim de uma faixa, posicionamento correto para execução de um movimento e passar por um veículo com velocidade inferior (JONES, 2004).

Os modelos de *Gap Acceptance* determinam a distância necessária para que um condutor decida realizar ou não um movimento de incorporação ao fluxo ou transposição de uma interseção. Assim como nos casos anteriores, a distância mínima necessária varia conforme as características do veículo e condutor.

As simulações macroscópicas descrevem sistemas viários com um nível menor de detalhe e os principais parâmetros são tráfego, velocidade e densidade. Os modelos matemáticos utilizados são em sua maioria determinísticos, uma vez que o fluxo é uma constante. São utilizados para simulação de grandes áreas, como uma cidade ou a interação de um conjunto de rodovias (DOROKHIN, 2020).

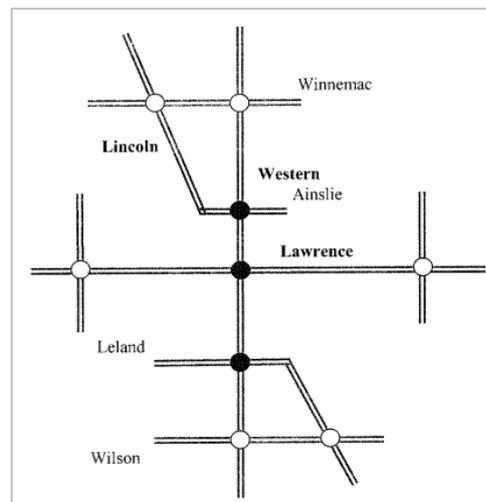
Ocupando uma posição intermediária, entre os modelos de simulação microscópica e macroscópicas está a classificação mesoscópica. Nestes modelos são atribuídas diferentes características para os veículos e condutores, porém, as análises apresentam um nível menor de detalhamento.

## 2.5 ESTUDOS ANTERIORES

### 2.5.1 Chicago – Illinois – Estados Unidos (2001)

Park *et al.* (2001) estudaram a operação de um sistema viário no município de Chicago, no estado de Illinois dos Estados Unidos. Foram obtidos os volumes e movimentos das aproximações de 9 (nove) interseções ao longo da via nos picos da manhã e tarde e levantados o tamanho das filas máximas. A Figura 7 ilustra a rede estudada.

Figura 7 - Rede do estudo em Chicago – Estados Unidos (2001)



Fonte: Park *et al.* (2001)

A partir dos dados levantados em campo, foram obtidos dois planos semaforicos, sendo um deles a partir do software TRANSYT-7F e outro por meio de um modelo de otimização de planos semaforicos estocástico de Algoritmo Genético.

As análises foram procedidas a partir do software de simulação microscópica para tráfego urbano CORSIM, desenvolvido pela *Federal Highway Administration* (FHWA). A medida de desempenho escolhida para comparação dos cenários foi o tempo em fila.

Os resultados obtidos demonstraram que o plano proposto pelo modelo de otimização de ciclos semaforicos por algoritmo genético apresentou maior consistência que o plano semaforico obtido através do TRANSYT-7F. Os testes foram realizados por meio de variações na demanda pra medir a adequação dos ciclos as dinâmicas do trânsito.

### **2.5.2 Lawrence – Kansas – Estados Unidos (2001)**

Yang (2001) estudou a operação da via arterial Iowa Street, localizada no município de Lawrence, no estado de Kansas dos Estados Unidos. Foram obtidos os volumes e movimentos das aproximações de 9 (nove) interseções ao longo da via, nos períodos de 7:00 às 10:00, 11:00 às 14:00 e 15:00 às 18:00. Também foram levantadas as características geométricas das vias e os ciclos semaforicos reais.

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados 6 planos semaforicos. Sendo eles:

- Plano Atual (medido em campo);
- Plano otimizado a partir do Synchro, considerando operações isoladas de cada interseção;
- Plano otimizado a partir do Synchro, considerando operação coordenada das interseções;
- Plano otimizado a partir do TRANSYT-7F;
- Plano otimizado a partir do PASSER, com coordenação das interseções pelo método *U-band (uniform bandwidth)*; e,
- Plano otimizado a partir do PASSER, com coordenação das interseções pelo método *V-band (variable bandwidth)*.

As análises foram procedidas utilizando o software de simulação microscópica NETSIM. As medidas de desempenho escolhidas para comparação dos cenários foram atraso médio, percentual de paradas, velocidade média, consumo de combustível e emissão de poluentes.

Ao atribuir pontuações para cada uma das medidas de desempenho avaliadas, e analisar comparativamente com o plano semaforico levantado em campo, o autor identificou ganhos de desempenho para todos os planos semaforicos obtidos por meio das ferramentas de otimização. Ademais, o software PASSER utilizando o método U-band obteve o melhor desempenho geral. A Tabela 3, contém de forma resumida os resultados obtidos no estudo.

Tabela 3 - Resumo Resultados, Lawrence - Kansas

Medida de Desempenho	Atual	SYNCHRO Isoladas	SYNCHRO coord.	TRANSYT	PASSER U-band	PASSER V-band
Atraso (s/veic)	26,1	26,37	24,2	27,6	21,55	22,58
Paradas (%)	50,61	48,26	43,69	41,09	37,44	41,21
Velocidade (mi/h)	20,9	20,94	21,53	20,75	22,32	22,11
Combustível (gal)	490	486,3	470,2	475,9	447,4	450,6
Emissão de Poluentes						
HC	0,206	0,204	0,2	0,196	0,188	0,188
CO	9,84	9,692	9,552	9,058	8,865	9,196
NO <sub>2</sub>	0,625	0,62	0,603	0,585	0,564	0,569

Fonte: Adaptado de Yang (2001)

### 2.5.3 Fairfax – Virginia – Estados Unidos (2003)

Park *et al.* (2003) estudaram a operação da via arterial Lee-Jackson Memorial Highway (U.S. Route 50), localizada no município de Fairfax, no estado de Virgínia dos Estados Unidos. Foram obtidos os volumes e movimentos das aproximações de 12 (doze) interseções ao longo da via, bem como ciclos semaforicos e tempos de viagens.

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados cinco planos semaforicos. Sendo eles:

- Plano Base (fornecido pelo Departamento de Transportes de Virginia);
- Plano Atual (medido em campo);
- Plano otimizado a partir de Algoritmo Genético;
- Plano otimizado a partir do Synchro; e,
- Plano otimizado a partir do TRANSYT-7F.

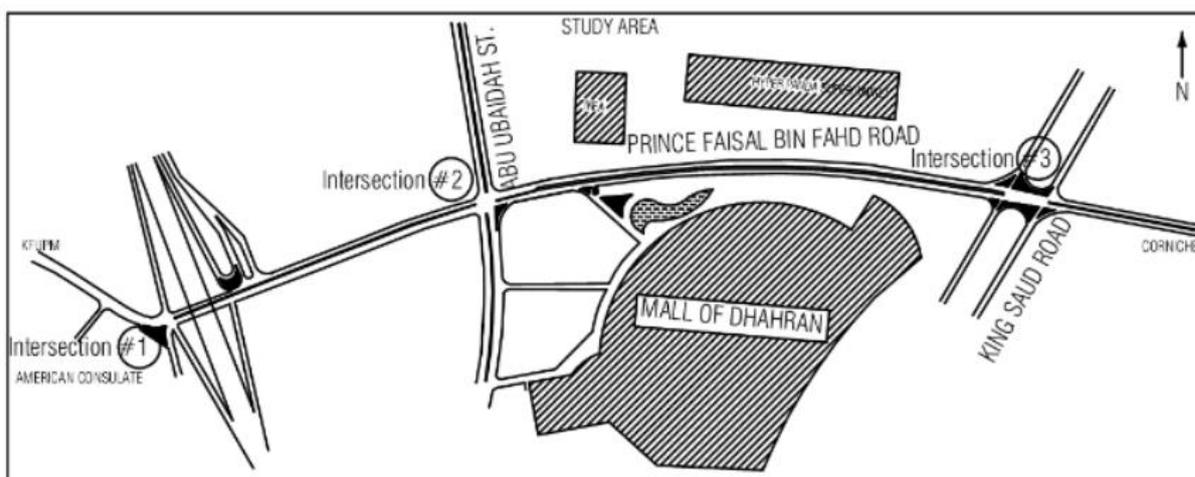
As análises foram procedidas utilizando o software de simulação microscópica VISSIM, devidamente calibrado para o contexto estudado. As medidas de desempenho escolhidas para comparação dos cenários foram Tempo Médio de Viagem e Atraso Médio.

Os resultados obtidos demonstraram ganhos operacionais pouco significativos para os planos semafóricos obtidos a partir do Algoritmo Genético, Synchro e TRANSYT. Todavia, ao comparar o plano base com o atual, foi identificado uma redução de 17,1% no tempo de viagem e redução de 36,6% no atraso total do sistema.

#### 2.5.4 Al Khobar – Provincia Oriental – Arábia Saudita (2014)

Ratrou e Reza (2014) estudaram a operação da via arterial Prince Faisal Bin Fahd Road no município de Al Khobar, localizado na Provincia Oriental da Arábia Saudita. Foram obtidos os volumes e movimentos das aproximações de 3 (três) interseções ao longo da via no pico da manhã. Ademais, foram levantados a velocidade, tamanho das filas e os ciclos semafóricos atuais. A Figura 8, ilustra a rede estudada.

Figura 8 - Rede do estudo em Al Khobar – Arábia Saudita (2014)



Fonte: Ratrou e Reza (2014)

A partir das pesquisas de campo foram obtidos três planos semafóricos. O primeiro deles, corresponde ao coletado *in loco*. Os demais foram obtidos a partir dos softwares de otimização de planos semafóricos TRANSYT e Synchro.

As análises foram procedidas utilizando o software de simulação microscópica PARAMICS, calibrado com dados de pesquisas anteriores realizadas em sistema viário com características similares à analisada. As medidas de desempenho escolhidas para comparação dos cenários foram tamanho da fila e atraso médio.

Após comparar o desempenho dos planos semafóricos, foram observados ganhos de eficiência entre a situação observada em campo e os planos obtidos pelas

ferramentas de otimização. Além disso, o plano obtido por meio do TRANSYT apresentou menores filas e atrasos médios.

### 2.5.5 Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil (2019)

Magalhães *et al.* (2019) estudaram a operação de um trecho composto pelas vias arteriais Av. Pedro II e Av. Tancredo Neves no município de Belo Horizonte, localizado no estado de Minas Gerais no Brasil. A Figura 9, ilustra a rede estudada.

Figura 9 - Rede do estudo em Belo Horizonte – Brasil (2019)



Fonte: Magalhães *et al.* (2019)

Foram obtidos os volumes e movimentos das aproximações de cinco interseções ao longo das vias no pico da tarde, características geométricas das vias, os ciclos semaforicos atuais e informações acerca das linhas de ônibus que circulam no local.

Para o desenvolvimento dos estudos, foram considerados quatro planos semaforicos distintos. O primeiro deles, corresponde ao coletado *in loco*. Os demais foram obtidos a partir do software de otimização de planos semaforicos TRANSYT, utilizando os tempos totais de ciclo pré-estabelecidos pelo autor de 90, 120 e 150 segundos.

As análises foram procedidas utilizando o software de simulação microscópica AIMSUN, devidamente calibrado para representar de maneira adequada as condições

locais. As medidas de desempenho escolhidas para comparação dos cenários foram atraso, número de paradas, densidade, velocidade, fluxo, fila média, fila virtual média, tempo parado, tempo de viagem e veículos aguardando para entrar na rede.

Após comparar os resultados obtidos o autor concluiu que houve um ganho operacional na rede de simulação para todos os planos semaforicos obtidos a partir do TRANSYT. Sendo o plano com tempo total de ciclo de 90 segundos aquele que obteve os melhores resultados.

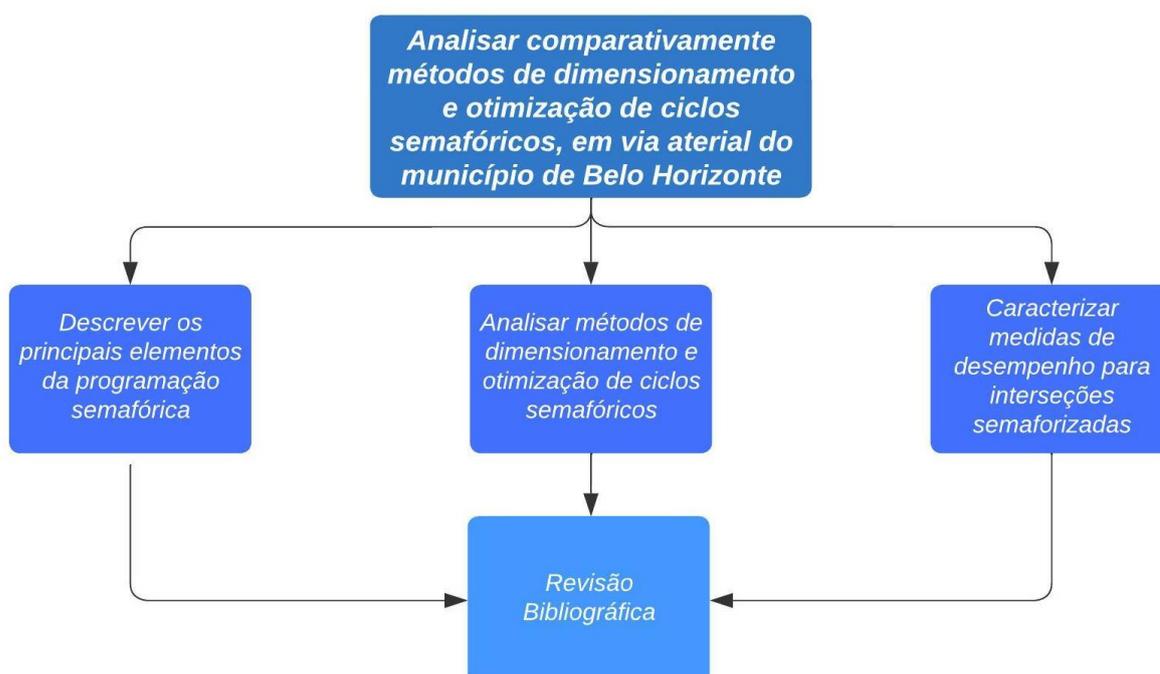
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é de natureza prática, desenvolvido por meio de um estudo de caso, para geração de conhecimento para solução de problemas específicos. Quanto a abordagem metodológica, é proposto um método quantitativo, baseado em medidas de análise padronizadas e sistemáticas. Por fim, o objetivo da pesquisa é exploratório uma vez que proporciona maior familiaridade com o problema e propõe medidas para otimização de processos (GIL, 2002).

O principal objetivo do trabalho consiste na análise comparativa de métodos utilizados internacionalmente para o dimensionamento de ciclos semaforicos. O fluxograma do trabalho, apresentado da Figura 12 a 12 foi elaborado com a finalidade de apresentar os principais processos a serem desenvolvidas para atingir tal objetivo.

A execução do trabalho pode ser dividida em três etapas principais. A primeira delas consiste na fundamentação teórica e identificação de referências a serem seguidas no decorrer do trabalho. Esta etapa foi apresentada no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.

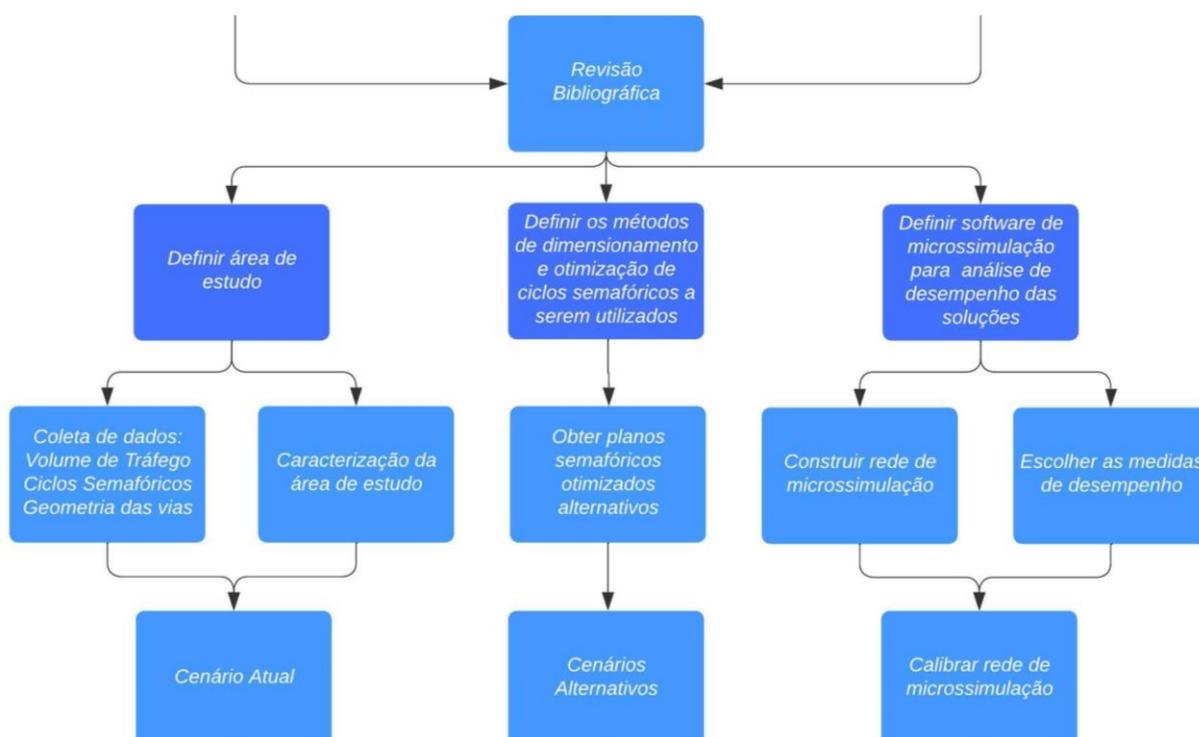
Figura 10 – 1ª Etapa do desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autoria própria (2022)

A segunda etapa é compreendida pela construção dos cenários que serão simulados. Neste momento será construída a rede de simulação capaz de representar com fidelidade a realidade da interseção estudada. Para tanto, será realizada a caracterização da área de estudo e serão analisados os dados que serão utilizados como entrada do modelo. Posteriormente serão obtidos os ciclos semafóricos otimizados a partir dos métodos estabelecidos.

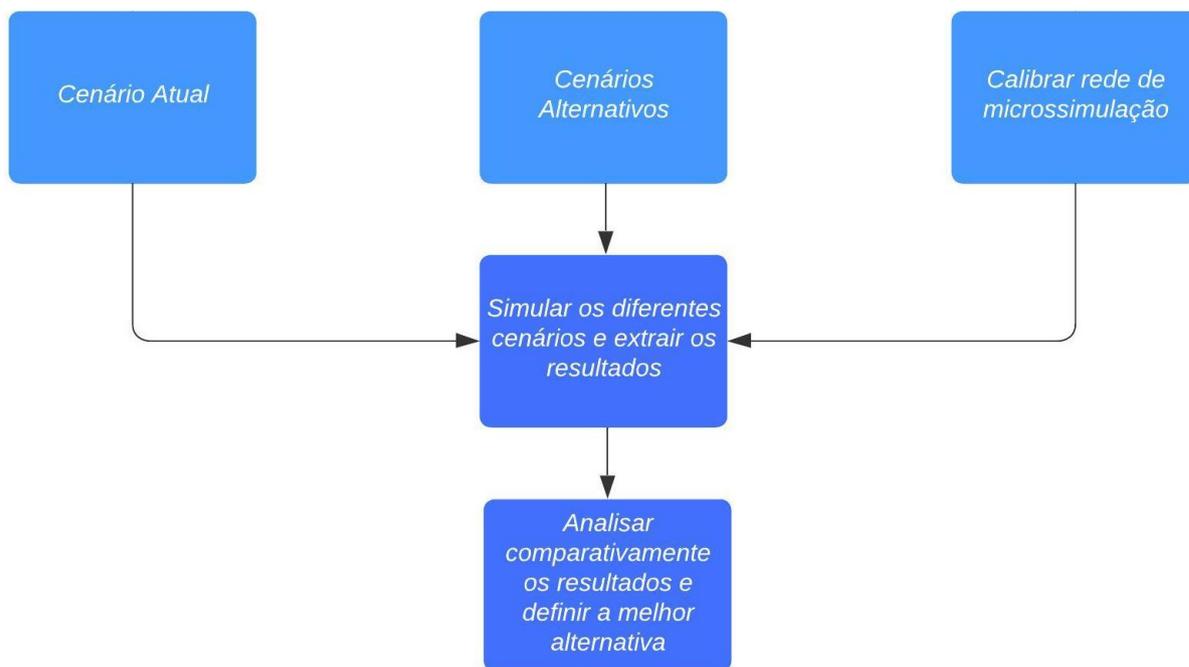
Figura 11 - 2ª Etapa de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autoria própria (2022)

A terceira etapa corresponde à execução das simulações e obtenção de resultados para validação do modelo e comparação dos cenários a partir das medidas de desempenho de interesse. Após as análises serão alcançados os objetivos e apresentadas as conclusões do estudo.

Figura 12 – 3ª Etapa de desenvolvimento do trabalho

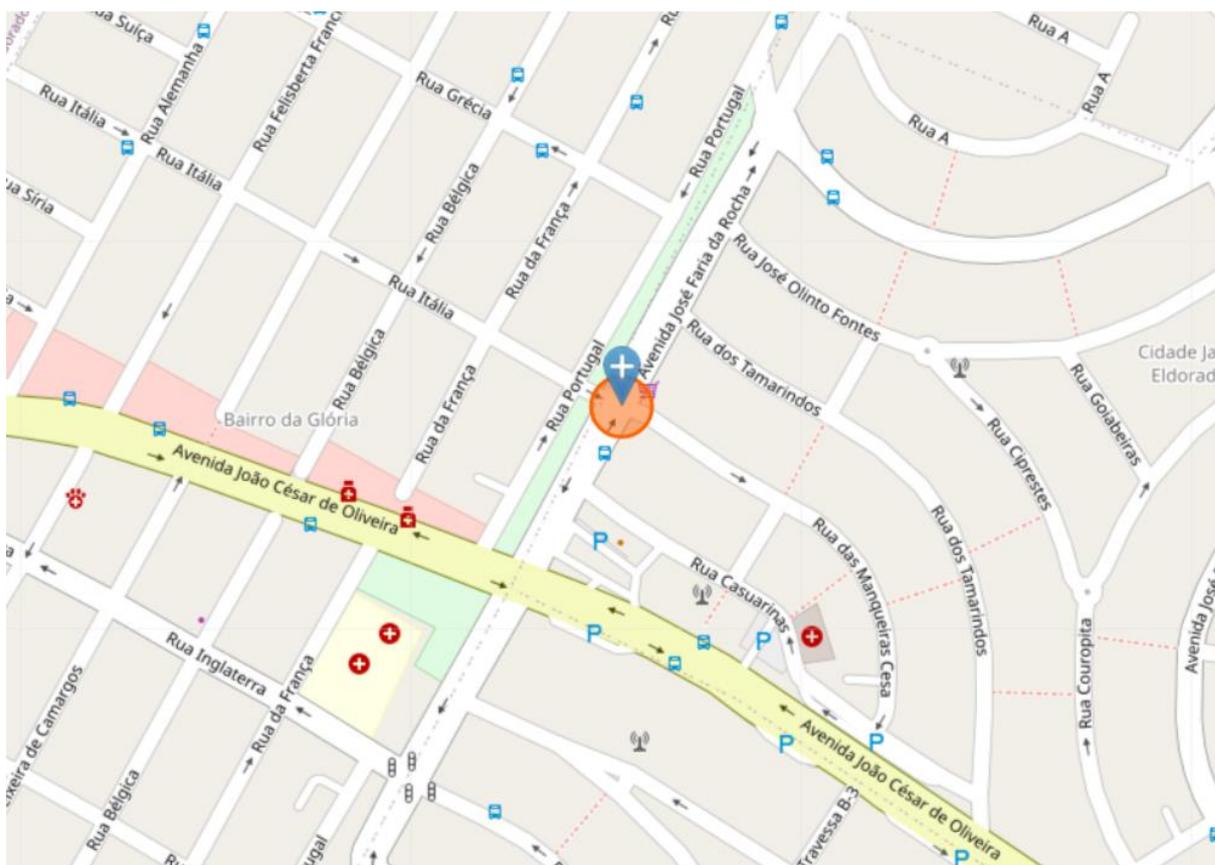


Fonte: Autoria própria (2022)

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para desenvolvimento do estudo consiste na interseção da Av. José Faria da Rocha com R. Itália e R. das Mangueiras, localizada na regional Eldorado do município de Contagem - MG. A Figura 13 foi obtida a partir do Open Street Map, e ilustra a localização da interseção.

Figura 13 - Local do Estudo - Interseção da Av. José Faria da Rocha com R. Itália



Fonte: Open Street Map (2022)

O município de Contagem é o terceiro mais populoso do estado de Minas Gerais, com população estimada em 673.849 habitantes e área territorial de 194,746 km<sup>2</sup>, de acordo com informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Este faz parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, onde, devido ao crescimento acelerado das áreas urbanizadas formaram um aglomerado urbano (conurbação) com a capital Belo Horizonte e outras cidades limítrofes.

De acordo com dados do ano de 2020, o Produto Interno Bruto – PIB de Contagem é composto principalmente pelas atividades econômicas de comércio e serviços (51%) e indústria (22%). A região do Eldorado é um importante polo comercial do município.

De acordo com o ordenamento territorial do município de Contagem, cujo objetivo é orientar a ocupação e uso do espaço urbano, utilizando como referência as características sociais, ambientais, econômicas, geográficas, bem como as diretrizes de planejamento, a região do Eldorado é caracterizada por zonas adensáveis. Estas zonas indicam condições favoráveis ao adensamento construtivo e populacional.

A Av. José Faria da Rocha, objeto do presente estudo, corresponde a uma via coletora principal de grande importância para a circulação interna da região do Eldorado. Esta possui sentido bidirecional, com duas faixas por sentido separadas por divisor central. Ademais, a via dá acesso a Av. João Cesar de Oliveira, via arterial que conecta as regionais Sede e Industrial, bem como os municípios de Contagem e Belo Horizonte. A Figura 14 ilustra a aproximação da Av. Faria da Rocha, no sentido Sul – Norte.

Figura 14 - Av. José Faria da Rocha



Fonte: Google Street View (2021)

A R. Itália, aproximação Oeste da interseção, apresenta características de via local, com elevado grau de acessibilidade e mobilidade condicionada as limitações da via. Possui sentido unidirecional (oeste – leste) e duas faixas no local da interseção. A Figura 15 representa a aproximação da R. Itália, no sentido de fluxo, em direção a interseção estudada.

Figura 15 - Rua Itália



Fonte: Google Street View (2022)

Por fim, a R. das Mangueiras, aproximação leste da interseção, também possui características de via local. Possui sentido unidirecional de circulação (oeste – leste) e apenas uma faixa. A Figura 16 adiante indica a R. das Mangueiras, em direção oposta à Av. José Faria da Rocha.

Figura 16 - Rua das Mangueiras



Fonte: Google Street View (2019)

A interseção analisada, é controlada por sinalização semafórica de responsabilidade da Autarquia Municipal de Trânsito e Transportes de Contagem – TRANSCON. Os ciclos tem duração de 69 segundos no pico da manhã e 60 segundos no pico da tarde

distribuídos em três estágios. A programação semafórica será detalhada no desenvolvimento do trabalho.

### 3.1.1 Volumes de Tráfego

Para execução do trabalho, foram utilizados volumes de tráfego fornecidos pela empresa Systra Engenharia e Consultoria Ltda. Estes foram suficientes para caracterizar a demanda do sistema viário, durante um dia típico

Foram utilizados os resultados de uma Contagem Volumétrica Classificada – CVC, realizada no dia 06 de dezembro de 2022 (terça-feira), durante o período de 24 horas ininterruptas. Os veículos foram classificados como “Carro”, “Moto”, “Ônibus” e “Caminhão”, e os volumes registrados em intervalos de 15 minutos, de acordo com o movimento realizado na interseção.

Para identificação dos movimentos da interseção, cada uma das seções das vias foi identificada, conforme indicado na Figura 17 abaixo. Os resultados da pesquisa estão apresentados no Anexo A desse trabalho.

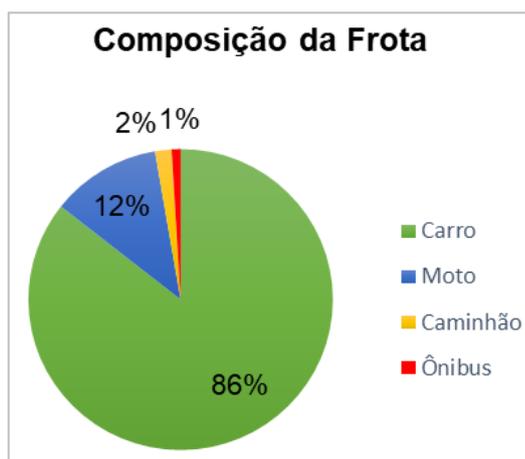
Figura 17 - Identificação dos movimentos da interseção



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023)

No total, foram contabilizados 30.207 veículos, distribuídos entre os 9 movimentos da interseção. Os resultados da composição da frota são mostrados no gráfico da Figura 18. Os automóveis têm a maior participação, representando 86% dos veículos pesquisados. A segunda maior participação é das motocicletas, representando 12%. Em seguida, estão os ônibus e caminhões, representando 2% e 1%, respectivamente.

Figura 18 - Composição da Frota



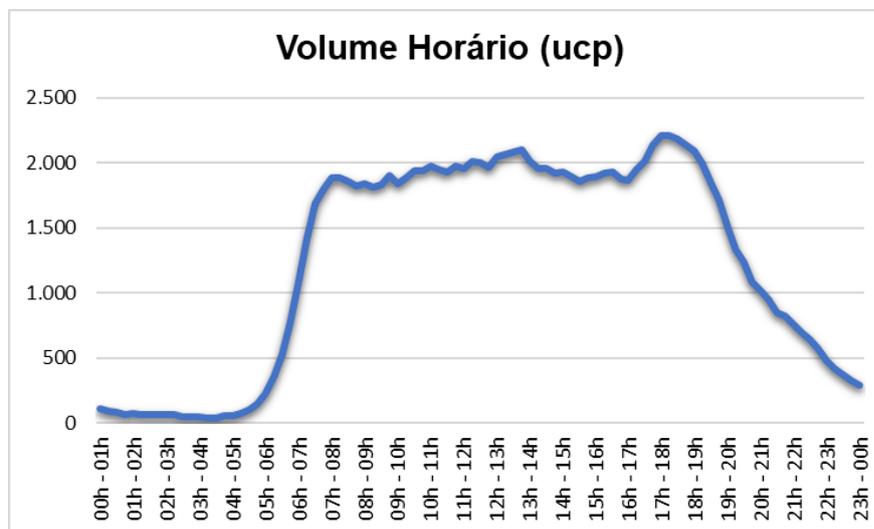
Fonte: Autoria própria, 2023

Com o objetivo de analisar comparativamente os fluxos de veículos entre os movimentos da interseção e durante os diferentes horários do dia, estes foram convertidos para a Unidade de Carro de Passeio – UCP. Para tanto, foram aplicados os fatores de equivalência recomendados pelo CONTRAN (2014), sendo adaptado apenas o fator das motos para o contexto local:

- Moto = 0,50;
- Carro = 1,00;
- Ônibus = 2,00;
- Caminhão = 2,00

O gráfico da Figura 19, apresenta a distribuição horária do volume de tráfego ao longo do dia de pesquisa. Foi possível verificar que intervalo de pico aferido no local ocorreu das 17h15 às 18h15 com 2.211 ucp. O valor corresponde a 7,6% do total diário e possui distribuição horária bastante uniforme, conforme indicado o Fator Hora Pico - FHP igual a 0,957.

Figura 19 - Volume Horário (ucp)



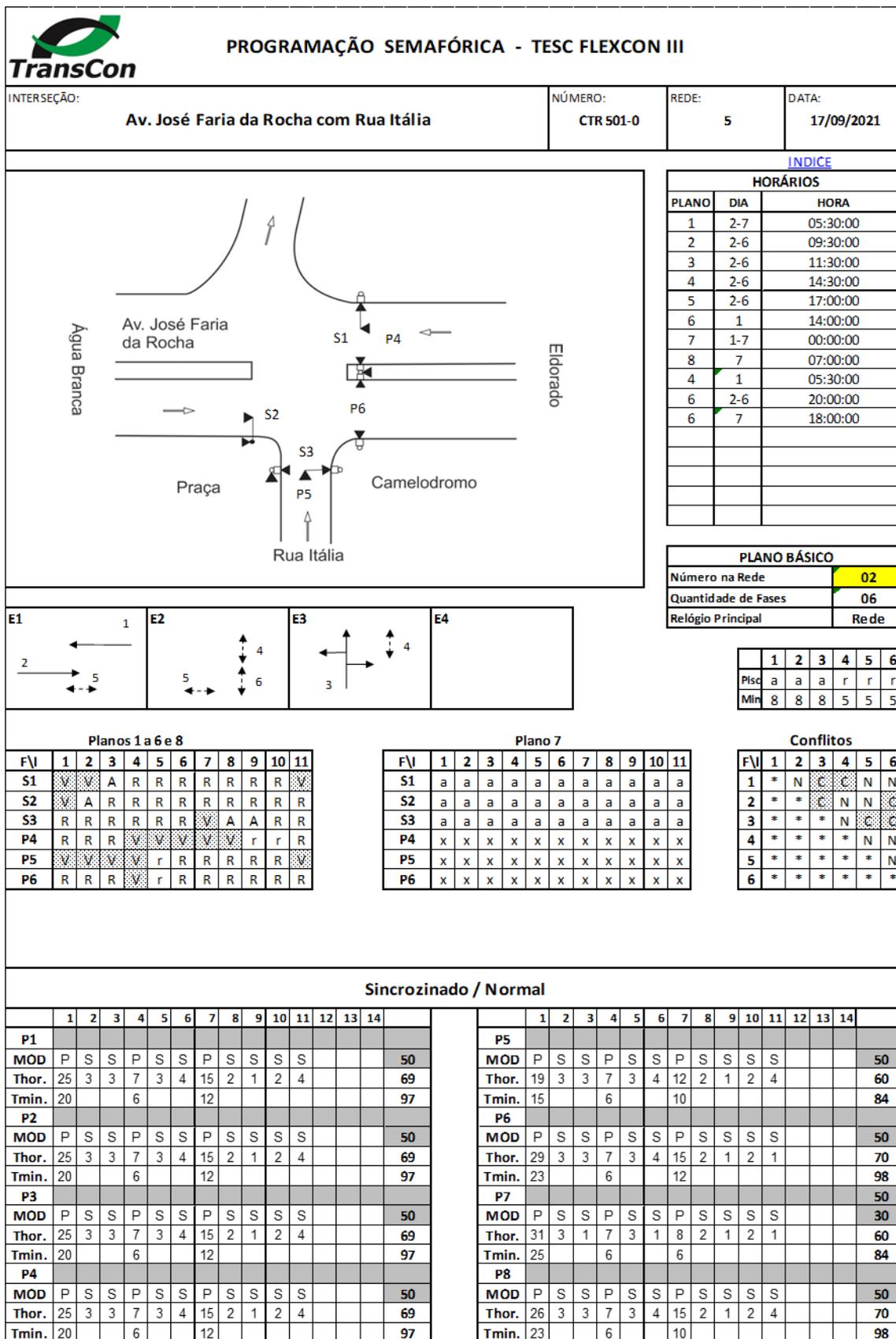
Fonte: Autoria própria, 2023

### 3.1.2 Ciclo Semafórico

O controle do semáforo da interseção em estudo, é de responsabilidade da TRANSCON, autarquia responsável pela mobilidade urbana de Contagem. No local são utilizados planos semafóricos específicos para atender as variações da demanda ao longo da semana e dia.

Desta forma, para analisar a situação atual do local em estudo, durante o horário de pico de um dia típico, será utilizado o plano semafórico em operação de segunda-feira a sexta-feira no intervalo entre as 17:00 e 20:00. O tempo de ciclo é de 60 segundos, distribuídos em 3 estágios, sendo um deles, destinado a travessia exclusiva de pedestres. A diante, na Figura 20 é apresentado o Diagrama de Intervalos Luminosos e o Diagrama de estágios disponibilizados pela TRANSCON.

Figura 20 - Programação Semafórica Atual



Fonte: TRANSCON (2022)

### 3.1.3 Características Geométricas da Interseção

Os elementos geométricos da interseção foram levantados em campo e complementados remotamente por meio do *Google Street View*. Para cada uma das aproximações foi identificado o número e largura das faixas de tráfego, existência e largura de separadores centrais, existência de estacionamento, travessias de pedestres, e inclinações longitudinais.

Os resultados obtidos foram utilizados como entradas para a elaboração da rede de simulação e dimensionamento dos ciclos semafóricos otimizados a serem utilizados comparativamente. Estes foram apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Características Geométricas da Interseção

Características	Av. José Faria da Rocha (B)	Av. José Faria da Rocha (C)	Rua Itália (A)	Rua das Mangueiras (D)
Número de Faixas	2	2	2	1
Largura das Faixas	3,00 m	3,00 m	3,00 m	6,00 m
Largura do Canteiro Central	1,80 m	1,80 m	-	-
Declividade	- 6%	6%	0%	0%
Travessia de Pedestres	Sim	Não	Sim	Sim
Classificação da Via	Coletora	Coletora	Local	Local
Velocidade Regulamentada	40 km/h	40 km/h	30 km/h	30 km/h
Estacionamento Lateral	Não	Não	Não	Lado Direito

Fonte: Autoria Própria (2023)

## 3.2 DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO CICLO SEMAFÓRICO

Para o dimensionamento e otimização dos ciclos semafóricos da interseção em estudo, foi utilizado o software Synchro versão 11 e uma planilha eletrônica desenvolvida para o estudo, a partir do Método de Webster. A escolha foi feita com base na relevância e reconhecimento destas ferramentas, amplamente utilizadas, conforme demonstrado no capítulo 2.5 - Estudos Anteriores da revisão bibliográfica. Ademais, o Método de Webster é a metodologia atualmente indicada no Manual Brasileiro de Sinalização e Trânsito – Volume V – Sinalização Semafórica.

O Synchro é recomendado pela usabilidade amigável e compatibilidade com diversos programas de simulação. Em contrapartida, o Método de Webster é de fácil aplicação

e compreensão, tendo grande aplicabilidade prática e demandando menos recursos computacionais. Os planos semaforicos obtidos a partir de cada um dos softwares, corresponderão a cenários alternativos a serem analisados e comparados com a situação atual da interseção.

### **3.2.1 Synchro**

O processo para se obter o ciclo semaforico ótimo por meio do Synchro, tem início com a reprodução do sistema viário a ser analisado no ambiente do software. Para tanto, foram desenhados os arcos e nós que representam as aproximações e a interseção do presente estudo.

A partir da ferramenta é possível caracterizar as vias com elevado grau de detalhamento. Foram indicados o número e largura de faixas das vias, bem como os movimentos permitidos e os respectivos volumes de tráfego. Para cada aproximação foi definido um comprimento, declividade e velocidade regulamentada. Ademais, a região onde a interseção está localizada foi classificada como área comercial (*Central Business District – CBD*) indicando que na localidade ocorrem manobras de estacionamento, atividade de transporte público e privado de passageiros, curvas com raios pequenos e elevada circulação de pedestres.

Este conjunto de informações é utilizado para calcular o tempo de deslocamento no sistema, fatores de conversão e a capacidade da rede. A Figura 21, corresponde ao menu de configurações das vias do Synchro e contém todas as informações que foram inseridas no modelo (fonte na cor preta) e os dados calculados automaticamente nesta etapa (fonte na cor azul).

Figura 21 - Configurações das vias - Synchro

LANE SETTINGS												
Lanes and Sharing (#RL)		↕	↗					↕			↕	
Traffic Volume (vph)	295	37	190	0	0	0	0	1073	74	0	647	0
Future Volume (vph)	295	37	190	0	0	0	0	1073	74	0	647	0
Street Name	dss											
Link Distance (m)	—	105.1	—	—	110.4	—	—	131.0	—	—	168.0	—
Links Speed (km/h)	—	30	—	—	30	—	—	40	—	—	40	—
Set Arterial Name and Speed	—	EB	—	—	WB	—	—	NB	—	—	SB	—
Travel Time (s)	—	12.6	—	—	13.2	—	—	11.8	—	—	15.1	—
Ideal Satd. Flow (vphpl)	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900
Lane Width (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Grade (%)	—	0	—	—	0	—	—	-6	—	—	6	—
Area Type CBD	—	<input checked="" type="checkbox"/>	—									
Storage Length (m)	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0	0.0	—	0.0
Storage Lanes (#)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Right Turn Channelized	—	—	None									
Curb Radius (m)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Add Lanes (#)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lane Utilization Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	1.00	0.95	1.00
Right Turn Factor	—	1.000	0.850	—	—	—	—	0.990	—	—	1.000	—
Left Turn Factor (prot)	—	0.958	1.000	—	—	—	—	1.000	—	—	1.000	—
Saturated Flow Rate (prot)	—	1484	1317	—	—	—	—	3002	—	—	2856	—
Left Turn Factor (perm)	—	0.958	1.000	—	—	—	—	1.000	—	—	1.000	—
Right Ped Bike Factor	—	1.000	1.000	—	—	—	—	1.000	—	—	1.000	—
Left Ped Factor	—	1.000	1.000	—	—	—	—	1.000	—	—	1.000	—
Saturated Flow Rate (perm)	—	1484	1317	—	—	—	—	3002	—	—	2856	—
Right Turn on Red?	—	—	<input type="checkbox"/>									
Saturated Flow Rate (RTOR)	—	0	0	—	—	—	—	0	—	—	0	—
Link Is Hidden	—	<input type="checkbox"/>	—									
Hide Name in Node Title	—	<input type="checkbox"/>	—									

Fonte: Autoria própria (2023)

A etapa seguinte, consiste em detalhar o comportamento do trânsito no local. É possível indicar por exemplo os fluxos de pedestres e ciclistas, frequências de manobras de estacionamento e paradas de ônibus. Contudo, devido as limitações do estudo, foram informados apenas a distribuição do tráfego ao longo da hora de projeto, por meio do fator hora pico e o percentual de veículos pesados (soma das parcelas de coletivo e carga), ambos calculados a partir das contagens volumétricas realizadas no local. Também foi indicada a presença de faixa de estacionamento lateral na R. das Mangueiras.

A Figura 22 apresenta o menu de configurações dos volumes do Synchro. Nela é possível visualizar todas as informações que foram inseridas no modelo (fonte na cor preta) e os dados calculados automaticamente nesta etapa (fonte na cor azul).

Figura 22 - Configurações dos volumes - Synchro

VOLUME SETTINGS												
	EBL	EBT	EBR	WBL	WBT	WBR	NBL	NBT	NBR	SBL	SBT	SBR
Lanes and Sharing (#RL)		↕	↗					↕	↗		↕	↗
Traffic Volume (vph)	295	37	190	0	0	0	0	1073	74	0	647	0
Development Volume (vph)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Combined Volume (vph)	295	37	190	0	0	0	0	1073	74	0	647	0
Future Volume (vph)	295	37	190	0	0	0	0	1073	74	0	647	0
Conflicting Peds. (#/hr)	0	—	0	0	—	0	0	—	0	0	—	0
Conflicting Bicycles (#/hr)	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0
Peak Hour Factor	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Growth Factor	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Adjusted Flow (vph)	307	39	198	0	0	0	0	1118	77	0	674	0
Heavy Vehicles (%)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Bus Blockages (#/hr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Adj. Parking Lane?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Parking Maneuvers (#/hr)	—	—	—	0	0	0	—	—	—	—	—	—
Traffic from mid-block (%)	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—
Link OD Volumes	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Traffic in shared lane (%)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lane Group Flow (vph)	0	346	198	0	0	0	0	1195	0	0	674	0

Fonte: Autoria própria (2023)

Após configurar as vias e os volumes de tráfego, são definidos os critérios a serem seguidos para o controle dos fluxos das interseções. O programa é capaz de analisar interseções não semaforizadas, rotatórias e interseções semaforizadas operando em tempos fixos, semiatuados e atuados em coordenação ou não.

Neste momento são informados parâmetros do ciclo semaforico, como os movimentos permitidos durante a fase de luz vermelha, tempo de amarelo, tempo de vermelho geral, verde de segurança, a existência de estagio exclusivo para o trânsito de pedestres e suas durações. Com o objetivo de proporcionar maior similaridade com a situação real do local e devido as limitações do estudo, foram considerados os mesmos tempos de amarelo, vermelho geral e estagio exclusivo para pedestres da programação semaforica fornecida pela TRANSCON.

Nesta etapa é identificado o nível de prioridade de cada um dos grupos de movimento, quais deles podem acontecer simultaneamente e também a ordem dos estágios. Caso o objetivo seja analisar a operação de um semaforico existente, também podem ser inseridos o tempo de ciclo e o início e fim do verde para cada grupo semaforico.

Complementarmente, durante a configuração das fases podem ser especificados os comprimentos dos veículos a serem considerados, o intervalo mínimo entre veículos,

tempo de reação dos motoristas e outros parâmetros. Todos estes foram mantidos conforme padrão do software.

### **3.2.2 Método de Webster**

A otimização do ciclo semaforico para interseção em estudo a partir do Método de Webster teve como referência as definições e equações abordadas no capítulo 2.1 – Elementos da Programação Semaforica, da revisão bibliográfica deste trabalho. Desta forma, com o uso de planilhas eletrônicas de autoria própria, foram calculados todos os elementos necessários para se alcançar o objetivo.

O Fluxo de Saturação (FS) das aproximações foi definido seguindo os procedimentos indicados pelo HCM (equação 3). A escolha do método foi feita tendo em vista a possibilidade de utilizar parâmetros facilmente levantados para ajustar o resultado a realidade local. Para a aplicação neste estudo foram considerados os fatores de ajuste para largura da faixa ( $f_w$ ), presença de veículos pesados ( $f_w$ ), greide das aproximações ( $f_g$ ) e tipo de área ( $f_a$ ).

Após obter o fluxo de saturação de cada aproximação, a etapa seguinte consiste em identificar a Taxa de Ocupação ( $y$ ) das aproximações por meio da relação deste parâmetro com o fluxo pesquisado (Equação 1), em veículos de passeio por hora. Os resultados possibilitam identificar o movimento crítico da interseção e posteriormente impactará na distribuição dos tempos de fluxo livre de cada estágio.

O período de entreverdes, composto pela soma do tempo de amarelo ( $t_{am}$ ) e tempo de vermelho geral ( $t_{vg}$ ) foram calculados considerando premissas do Manual Brasileiro de Sinalização e Trânsito (CONTRAN, 2014). Desta forma, adotou-se tempo de percepção e reação do condutor ( $t_{pr}$ ) de 1,00 segundos, máxima taxa de frenagem admissível ( $a_{ad}$ ) de 3,00 m/s, aceleração da gravidade ( $g$ ) igual a 9,8 m/s<sup>2</sup> e comprimento médio dos veículos de 5,00 m.

Além disso, foi atendida a recomendação de que para aproximações com velocidade máxima regulamentada igual ou inferior a 40 km/h o tempo de amarelo não deve ser superior a 3 segundos.

O ciclo ótimo foi calculado por meio do Método de Webster que relaciona o tempo perdido com as taxas de ocupação. Para que a comparação dos cenários seja possível, optou-se por incluir um estágio destinado exclusivamente a circulação de pedestres com a mesma duração do existente, assim como foi feito na otimização a partir do Synchrono. Sendo assim, o tempo perdido corresponde a soma dos entreverdes e estágio exclusivo para pedestres de um ciclo completo.

Por fim, foram calculados os tempos de verde efetivo para cada estágio, conforme Equação (8). Diante da limitação dos dados de campo não foram adotados tempo perdido inicial ( $t_{pin}$ ) e tempo perdido final ( $t_{fin}$ ), desta forma, o tempo de verde real é igual ao arredondamento simples do tempo de verde efetivo. No mais, seguindo recomendação disponível em CONTRAN (2014) foi considerado o tempo mínimo de verde por estágio de 10s, garantindo a segurança dos utilizadores.

### **3.3 MICROSSIMULAÇÃO**

O cenário atual e os cenários alternativos (obtidos a partir da otimização dos ciclos semaforicos por meio do Synchrono e Método de Webster) serão analisados através da simulação microscópica. Para tanto, será utilizado o software Transmodeler, desenvolvido pela empresa estadunidense Caliper.

#### **3.3.1 Construção do modelo**

A rede de simulação foi construída a partir dos dados levantados em campo, imagens de satélite e do *Google Street View*. Desta forma, buscou-se obter um modelo que pudesse reproduzir o comportamento real da interseção durante o horário de pico de um dia típico, com o maior nível de detalhe possível, garantindo confiabilidade nos resultados.

Desta forma, os arcos e nós foram projetados conforme características físicas e operacionais do sistema viário em estudo. A Av. José Faria da Rocha foi classificada como via coletora, com velocidade regulamentada de 40 km/h e fluxo de saturação base de 1.900 vp/h/faixa. Foram indicadas duas faixas de tráfego por sentido, com largura de 3,00 m cada. Também foi representado o canteiro central existente com 1,80 m de largura.

A R. Itália foi classificada como rua local, com velocidade regulamentada de 30 km/h e fluxo de saturação base de 1.900 vp/h/faixa. Esta foi desenhada com duas faixas na aproximação da interseção, cada uma com 3,00 de largura. A R. das Mangueiras foi classificada da mesma forma, todavia, apenas com uma faixa tráfego de 6,00 m e estacionamento de veículos permitido no bordo direito da pista.

Complementarmente foram especificados os movimentos permitidos em cada faixa das aproximações e indicadas as localizações das travessias de pedestres. A Figura 23 corresponde a interseção construída no Transmodeler.

Figura 23 - Projeção da interseção em estudo no Trasmodeler

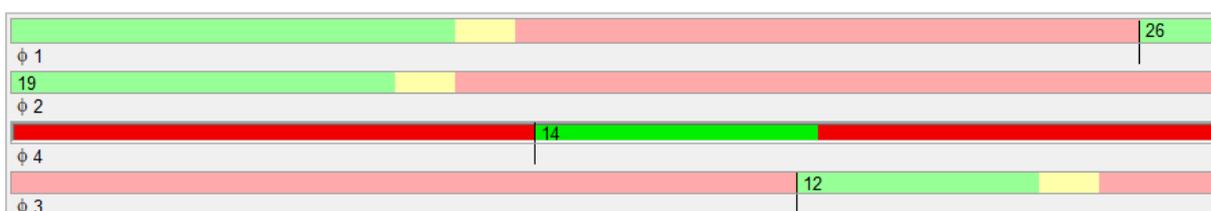


Fonte: Autoria Própria (2023)

Na sequência foram indicados os volumes pesquisados e seus respectivos movimentos na interseção. Também foi descrita a composição do tráfego, sendo considerados motos, carros, ônibus e caminhões. No mais, a distribuição do tráfego durante a hora pico foi especificada por meio do Fator Hora Pico (FHP).

O plano semafórico atualmente utilizado na interseção no intervalo horário de 17h00 às 20h00 de segunda a sexta-feira foi replicado tomando como referência as informações disponibilizadas pela TRANSCON. O ciclo possui 60 segundos de duração total e um estágio destinado exclusivamente à circulação de pedestres. O esquema indicado na Figura X representa a distribuição do ciclo entre os grupos semafóricos. Os símbolos “ $\Phi 1$ ” e “ $\Phi 2$ ” correspondem as aproximações da Av. Jose Faria da Rocha nos sentidos “B-C” e “C-B” respectivamente, “ $\Phi 3$ ” se destina a aproximação da R. Itália e “ $\Phi 4$ ” aos semáforos de pedestres.

Figura 24 - Ciclo Semafórico Atual - Transmodeler



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 3.3.2 Calibração

Junior *et. al* (2017) estudaram, por meio de Algoritmo Genético (AG), parâmetros de calibração do Transmodeler para a Av. do Contorno, localizada no município de Belo Horizonte. Os resultados obtidos demonstraram que os parâmetros encontrados pelo AG se adequaram de maneira satisfatória a realidade local.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, serão utilizados os parâmetros aplicados por Junior *et. al* (2017) devido as similaridades do comportamento dos usuários. Apesar dos estudos terem sido realizados em cidades diferentes, existe grande correlação entre Belo Horizonte e Contagem, uma vez que, ambas fazem parte da mesma região metropolitana e vivem um intenso processo de conurbação urbana. A Tabela 5 apresenta os parâmetros adotados.

Tabela 5 - Parâmetros de Calibração Transmodeler

Parâmetro	Categoria	Default	Belo Horizonte	
<i>Alpha (accelerating)</i>		3,81	3,03	
<i>Beta (accelerating)</i>		-1,67	-1,21	
<i>Gamma (accelerating)</i>	<i>Car-following model</i>	-0,89	-1,15	
<i>Alpha (decelerating)</i>		4,65	4,79	
<i>Beta (decelerating)</i>		1,08	0,65	
<i>Gamma (decelerating)</i>		1,65	2,4	
<i>Constant</i>		-3,3	-1,8884	
<i>Path Influence Factor</i>	<i>Lane changing -</i>	-0,2	-0,1364	
<i>Minimum Speed Gain</i>	<i>Discretionary (DLC) -</i>	0,0984	0,1037	
<i>Average Speed Gain</i>	<i>Neighboring Lane Model -</i>	0,164	0,1149	
<i>Slow Vehicle in Passing Lane</i>	<i>Lane Choice Utility</i>	-0,75	-0,7467	
<i>Lane Not Connected</i>	<i>Function</i>	-3	-3,3499	
<i>Same Direction as Previous DLC</i>		0,75	0,8018	
<i>Minimum (Discretionary/Lead)</i>	<i>Gap acceptance model</i>	1	1	
<i>Minimum (Discretionary/Lag)</i>		<i>for Lane Changing -</i>	1,5	1,79
<i>Minimum (Mandatory/Lead)</i>		<i>Target Lane Gap</i>	1	0,52
<i>Minimum (Mandatory/Lag)</i>		<i>Acceptance model</i>	1,5	1,39

Fonte: Júnior et al. (2017)

### 3.3.3 Escolha das medidas de desempenho

A comparação dos resultados para o cenário atual (ciclo semafórico fornecido pela TRANSCON) e cenários alternativos (ciclos semafóricos calculados por meio do Synchro e Método de Webster) foram comparados a partir de um conjunto de medidas de desempenho em dois níveis diferentes.

O primeiro deles corresponde a análise feita para cada uma das aproximações. Para esta comparação foram considerados os resultados de atraso médio (s/veic), total de paradas, média de paradas e fila média (veic). O segundo compreende os resultados gerais da interseção. Neste caso foram utilizados atraso médio (s/veic), total de paradas, média de paradas e tempo médio parado (s/veic).

Optou-se por utilizar um conjunto de medidas de desempenho para comparação devido ao fato de que um parâmetro pode resultar a piora de um outro. Por exemplo, ciclos mais curtos podem (ou não) produzir filas menores porem elevar o número de paradas.

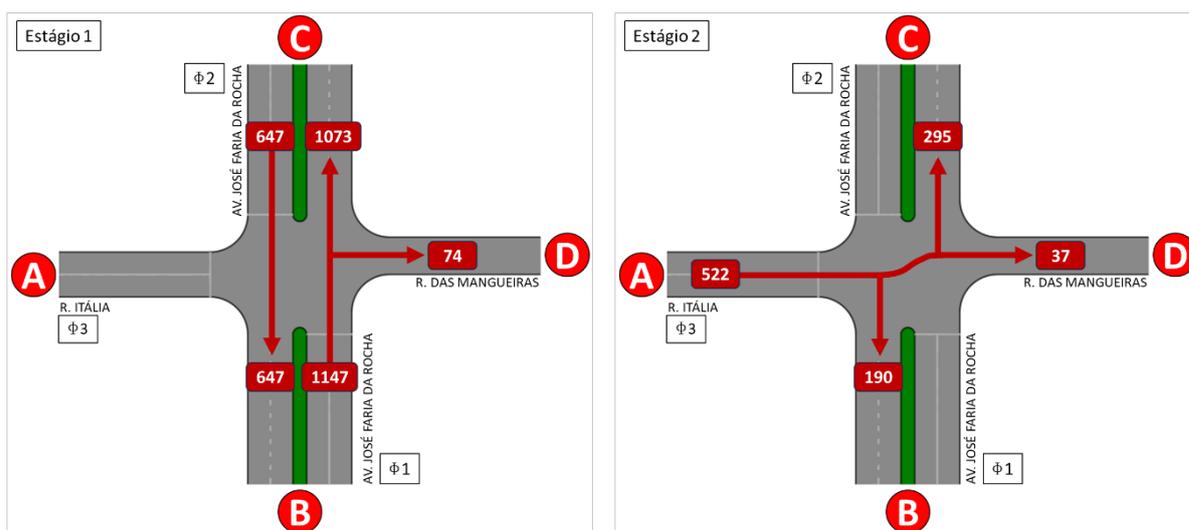
## 4 RESULTADOS

Este capítulo se destina a apresentação e discussão dos resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos abordados no capítulo anterior. Afim de reforçar o que foi anteriormente descrito, as aproximações da interseção foram identificadas da seguinte forma:

- Av. José Faria da Rocha (B): Sentido Sul – Norte
- Av. José Faria da Rocha (C): Sentido Norte – Sul
- R. Itália (A): Sentido Oeste – Leste

Complementarmente, foi produzida a figura 14 com o objetivo de apresentar os fluxos de cada um dos movimentos permitidos na interseção. Também estão identificados os estágios os grupos semaforicos de cada aproximação

Figura 25 - Diagramas da interseção estudada



Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE MICROSIMULAÇÃO

Após construir e calibrar o modelo com o objetivo de representar as características do sistema viário e do tráfego existente com o maior nível de precisão e confiabilidade possível, os resultados da simulação devem ser validados. Para tanto, os volumes de tráfego computados nas simulações do cenário atual foram comparados com os volumes pesquisados.

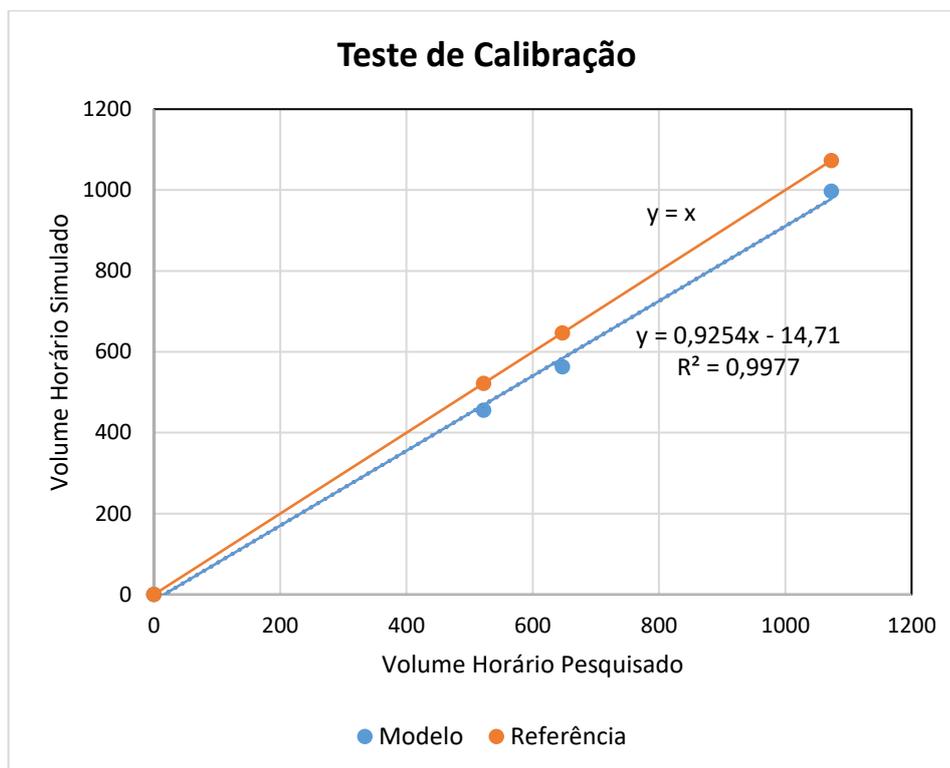
O primeiro método utilizado corresponde a regressão linear. Esta ferramenta permite avaliar a relação entre os volumes de tráfego de forma a compreender o grau de ajuste a partir de uma equação linear. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) representa a proporção de variabilidade na variável resposta (volumes simulados) com referência na variável preditora (volumes pesquisados).

O  $R^2$  varia entre 0,00 e 1,00, sendo que, quanto mais próximo do limite superior melhor o ajuste da regressão. O resultado obtido a partir da regressão linear apresentou  $R^2$  igual a 0,9977, que indica boa correlação entre as variáveis.

Também foi avaliado o coeficiente angular da equação que representa a proximidade entre os resultados simulados e pesquisados. O coeficiente igual a 1,00 indica “x” igual a “y”, logo, o resultado deve ser o mais próximo possível desse valor. O modelo em questão obteve coeficiente angular igual a 0,9254, resultado considerado satisfatório.

Figura 26 demonstra a regressão linear gerada a partir do software Excel. A linha na cor laranja corresponde a equação  $x = y$  e a linha azul a equação obtida a partir dos resultados pesquisados e simulados.

Figura 26 - Validação do modelo de simulação - Regressão Linear



Fonte: Autoria Própria (2023)

Outro método comumente utilizado para validação da performance de redes de simulação é o indicador Geoffrey E. Havers (GEH), cujo principal benefício é a adaptabilidade para avaliar volumes de diferentes escalas a partir do mesmo critério. A equação é aplicada para cada par de volumes pesquisado e simulado.

O indicador GEH precisa ser menor que 5 para indicar que o fluxo pode ser considerado consistente. Um GEH entre 5 e 10 indica que os fluxos simulados devem ser investigados, podendo haver erros nos dados ou modelo. Por fim, GEH maior que 10 demonstra alta probabilidade que haver erros significativos nos dados ou modelo.

No modelo utilizado, o indicador GEH foi calculado em todas as simulações do Cenário Atual, para cada uma das aproximações. Em todos os testes foram obtidos resultados menores que 5 para todos os volumes, demonstrando consistência satisfatória do modelo. A Tabela 6 contém os indicadores medidos para uma das simulações consideradas.

Tabela 6 - Validação do modelo de simulação - GEH

<b>Via</b>	<b>Sentido</b>	<b>Vs</b>	<b>Vr</b>	<b>GEH</b>
Av. José Faria da Rocha	BC	984	1073	2,74
Av. José Faria da Rocha	CB	554	647	3,75
R. Itália	CA+CB+CD	453	522	3,22
R. das Mangueiras	AD+BD	96	111	1,47

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tendo em vista que os dois métodos de validação apresentaram resultados satisfatórios, foi considerado que o modelo se mostrou com um bom nível de ajuste a realidade. Por consequência, os resultados obtidos a partir da análise dos cenários apresentam a confiabilidade desejada.

## 4.2 CICLOS OTIMIZADOS

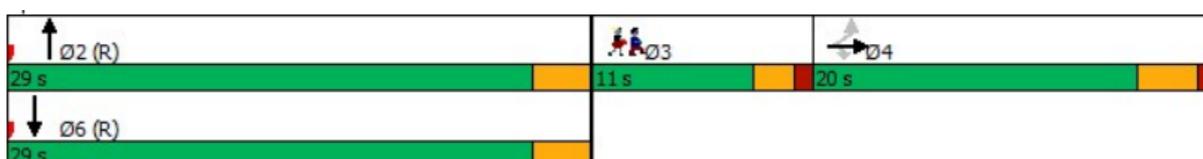
Nas seções adiante estão apresentados os resultados dos dimensionamentos e otimizações de ciclos semafóricos obtidos a partir do Synchro e Método de Webster, conforme procedimentos descritos no Capítulo 3 – Materiais e Métodos.

### 4.2.1 Ciclo Ótimo - Synchro

No presente estudo, foi adotado o ciclo mínimo de 40s e máximo de 120s. Nesse intervalo o software executa uma série de iterações, partindo do mínimo para o máximo com incrementos de 2s. Os resultados são analisados automaticamente durante o processo de otimização. O método utilizado pelo Synchro busca identificar o ciclo mais curto capaz de limpar o percentil crítico do tráfego combinado com uma boa performance calculada a partir de um índice de desempenho que correlaciona o atraso total com o número de paradas.

O ciclo ótimo obtido após todo processo anteriormente descrito possui 71s de duração. O primeiro estágio, fluxo livre para ambas as aproximações da Av. José Faria da Rocha tem 29s de verde e 3s de amarelo. Em seguida, tem início o estágio exclusivo para pedestres com duração total de 14s igual a situação existente. O terceiro estágio, fluxo livre para a aproximação da R. Itália tem 20s de verde, 3s de amarelo e 1s de vermelho geral. O diagrama de estágios do ciclo otimizado é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Ciclo semafórico otimizado - Synchro



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 4.2.2 Resultados Método de Webster

O cálculo do Fluxo de Saturação (FS), permite avaliar a quantidade máxima de veículos comportados em cada aproximação, durante 1 hora de fluxo ininterrupto, diante das características da geometria e do tráfego local. Os resultados obtidos, bem como os fatores de ajuste utilizados estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 – Cálculo do Fluxo de Saturação

Av. José Faria da Rocha (Seção B)				Av. José Faria da Rocha (Seção C)				R. Itália (Seção D)			
FS	3286,77	w	3,00	FS	3095,31	w	3,00	FS	3191,04	w	3,00
Fso	1900,00	HV	3,00%	Fso	1900,00	HV	3,00%	Fso	1900,00	HV	3,00%
N	2,00	E <sub>T</sub>	2,00	N	2,00	E <sub>T</sub>	2,00	N	2,00	E <sub>T</sub>	2,00
f <sub>w</sub>	0,93	G	-6,00	f <sub>w</sub>	0,93	G	6,00	f <sub>w</sub>	0,93	G	0,00
f <sub>HV</sub>	1,00	CBD	Sim	f <sub>HV</sub>	1,00	CBD	Sim	f <sub>HV</sub>	1,00	CBD	Sim
f <sub>g</sub>	1,03	f <sub>a</sub>	0,90	f <sub>g</sub>	0,97	f <sub>a</sub>	0,90	f <sub>g</sub>	1,00	f <sub>a</sub>	0,90

Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir da correlação do Fluxo de Saturação (FS) com o Fluxo Pesquisado (F), foi possível perceber que a interseção opera atualmente com baixas taxas de ocupação (y), logo, distante da condição de saturação. O movimento crítico corresponde a aproximação da Av. José Faria da Rocha (B), com taxa de ocupação igual a 0,33. A Figura 29 representa as Taxas de Ocupação obtidas.

Figura 29 – Cálculo da Taxa de Ocupação

Av. José Faria da Rocha (Seção B)		Av. José Faria da Rocha (Seção C)		R. Itália (Seção D)	
y	0,33	y	0,21	y	0,16
FS	3287	FS	3095	FS	3191
F	1073	F	647	F	522

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tomando como referência as premissas abordadas nos principais manuais brasileiros, foram calculados os tempos de amarelo (t<sub>am</sub>) e vermelho geral (t<sub>vg</sub>). Os resultados obtidos correspondem a 3 e 2 segundos, respectivamente, para cada uma das interseções. O resumo dos resultados e parâmetros utilizados está apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Cálculo dos entreverdes

Av. José Faria da Rocha (Seção B)				Av. José Faria da Rocha (Seção C)				R. Itália (Seção D)			
t <sub>ent</sub>	5,00	t <sub>pr</sub>	1,00	t <sub>ent</sub>	5,00	t <sub>pr</sub>	1,00	t <sub>ent</sub>	5,00	t <sub>pr</sub>	1,00
t <sub>am</sub>	3,30	v	11,11	t <sub>am</sub>	3,00	v	11,11	t <sub>am</sub>	3,00	v	8,33
t <sub>vg</sub>	2,25	a <sub>ad</sub>	3,00	t <sub>vg</sub>	2,25	a <sub>ad</sub>	3,00	t <sub>vg</sub>	2,40	a <sub>ad</sub>	3,00
<b>Tempo Real</b>		i	-0,06	<b>Tempo Real</b>		i	0,06	<b>Tempo Real</b>		i	0,06
		g	9,80			g	9,80			g	9,80
t <sub>am</sub>	<b>3,00</b>	d <sub>2</sub>	20,00	t <sub>am</sub>	<b>3,00</b>	d <sub>2</sub>	20,00	t <sub>am</sub>	<b>3,00</b>	d <sub>2</sub>	15,00
t <sub>vg</sub>	<b>2,00</b>	c	5,00	t <sub>vg</sub>	<b>2,00</b>	c	5,00	t <sub>vg</sub>	<b>2,00</b>	c	5,00

Fonte: Autoria Própria (2023)

Por fim, foi obtido o tempo de ciclo ótimo (t<sub>co</sub>) e em seguida os tempos de verde para os dois estágios analisados. Na primeira iteração de cálculos dos tempos de verde a

condição do verde de segurança não foi atendida. Logo, foi necessária uma nova iteração, para então atender à exigência estabelecida. Os resultados obtidos durante esta etapa do dimensionamento de ciclos semaforicos estão indicados na Figura 31.

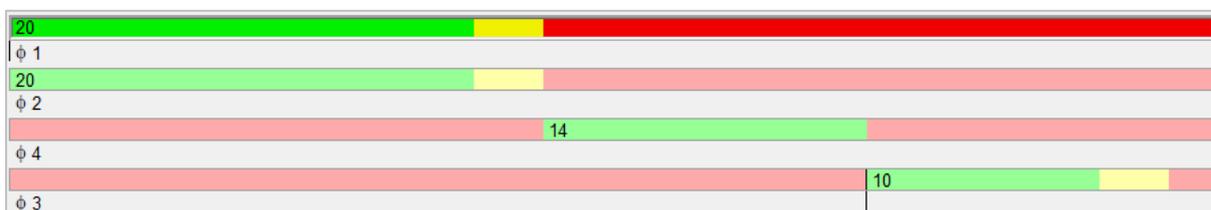
Figura 31 - Cálculo do tempo de ciclo e verdes

Tempo de ciclo			Verdes - Iteração 1		Verdes - Iteração 2	
<b>Método de Webster</b>			<b>Av. José Faria da Rocha (Seção B e C)</b>		<b>Av. José Faria da Rocha (Seção B e C)</b>	
$T_p$	22,00		$t_{v,real}$	10,00	$t_{v,real}$	20,00
$y_i$	0,33	0,16	$t_{v,efet,i}$	10,33	$t_{v,efet,i}$	19,96
$\sum y_i$	0,49		<b>R. Itália (Seção D)</b>		<b>R. Itália (Seção D)</b>	
$t_{co}$	37,51		$t_{v,real}$	5,00	$t_{v,real}$	10,00
			$t_{v,efet,i}$	5,18	$t_{v,efet,i}$	10,00
			<b><math>t_c</math></b>	<b>37,00</b>	<b><math>t_c</math></b>	<b>52,00</b>

Fonte: Autoria Própria (2023)

Conforme apresentado na figura anterior o tempo de ciclo ótimo obtido a partir do Método de Webster é igual a 52 segundos. Para melhor visualização da distribuição dos estágios durante o ciclo semaforico, foi elaborada a Figura 32.

Figura 32 - Ciclo semaforico otimizado - Webster



Fonte: Autoria Própria (2023)

### 4.3 RESULTADOS POR APROXIMAÇÃO

Para obtenção dos resultados, foram realizadas a partir do Transmodeler três simulações com diferentes sementes de números aleatórios para cada um dos cenários. Os resultados apresentados na Tabela 7 correspondem a média das simulações. Foram obtidos os atrasos médios, nível de serviço, total de paradas, média de paradas e fila média.

Tabela 7 - Síntese dos Resultados por Aproximação

Cenários	Av. José Faria da Rocha (B)	Av. José Faria da Rocha (C)	R. Itália (A)
<b>Atraso médio (s/veic)</b>			
Existente	11,07	14,43	21,55
Synchro	14,72	13,07	19,87
Webster	11,44	10,35	19,03
<b>Nível de Serviço (HCM)</b>			
Existente	B	B	C
Synchro	B	B	B
Webster	B	B	B
<b>Total de Paradas</b>			
Existente	584	364	375
Synchro	655	323	321
Webster	635	321	375
<b>Média de Paradas</b>			
Existente	0,58	0,65	0,82
Synchro	0,65	0,57	0,71
Webster	0,64	0,58	0,82
<b>Fila Média (veic)</b>			
Existente	7,92	10,12	12,51
Synchro	7,68	8,81	15,55
Webster	5,26	7,92	10,78

Fonte: Autoria Própria (2023)

De forma geral, tanto o cenário atual quanto os cenários alternativos apresentaram um bom desempenho operacional. Nos itens a seguir, cada uma das medidas de desempenho será analisada individualmente. Para tanto, afim de identificar melhoras ou pioras entre as alternativas, foram calculadas as diferenças percentuais tomando como referência o cenário atual.

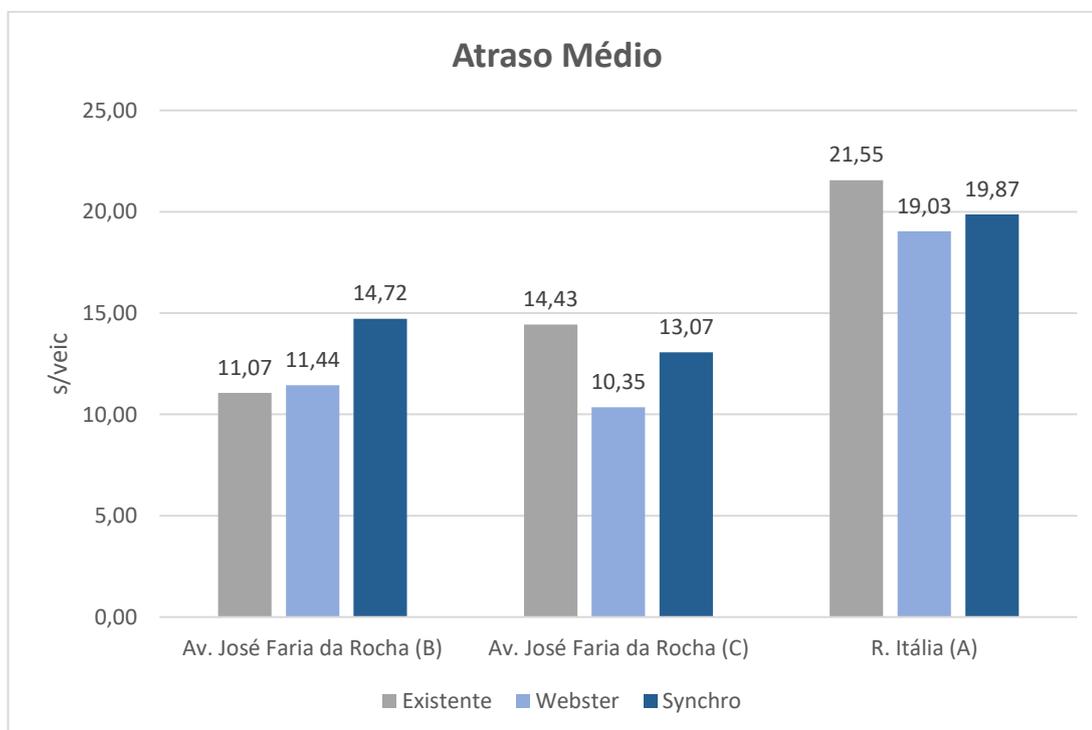
### 4.3.1 Atraso médio e Nível de Serviço

O atraso médio é uma importante medida de desempenho que consiste no tempo acrescido de viagem devido a reduções de velocidade ou paradas causadas pelo controlador de tráfego. A partir do tempo de atraso médio são definidos os níveis de serviço para as interseções semaforizadas (metodologia HCM).

No presente estudo, o cenário atual obteve os níveis de serviço “B” para ambas as aproximações da Av. José Faria da Rocha que indica boa progressão e ciclos curtos. A R. Itália apresentou nível de serviço “C”, classificação que indica que o tempo de verde pode não ser capaz de dissipar completamente as filas formadas. Os cenários alternativos resultaram no mesmo nível de serviço para as aproximações da Av. José Faria da Rocha, todavia, apresentaram melhoras para R. Itália onde foi atingido o nível de serviço “B”.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados para esta medida de desempenho, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Gráfico de comparação do Atraso Médio por aproximação



Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao comparar as diferenças percentuais, é possível confirmar que o ciclo ótimo obtido pelo método de Webster apresentou desempenho superior ao Synchro para todas as

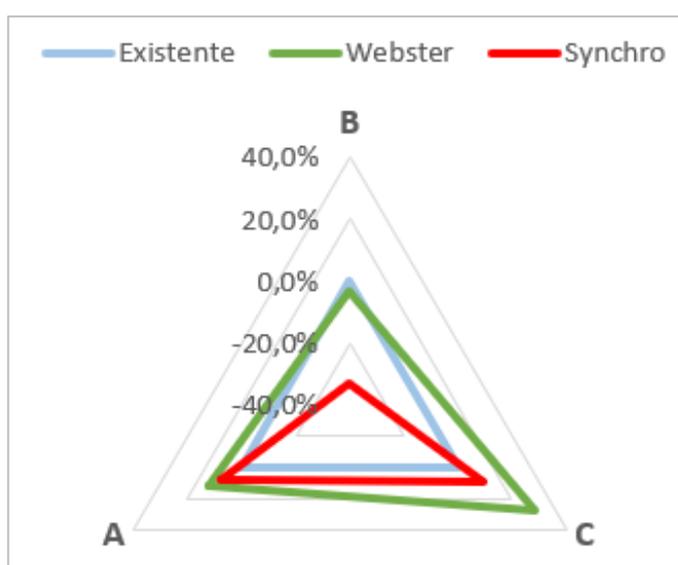
aproximações. Ademais, ambos os cenários alternativos indicaram perda de eficiência na aproximação (B) da Av. José Faria da Rocha e ganhos nas demais aproximações. As diferenças percentuais estão descritas na Tabela 8 e a sobreposição dos resultados apresentados por meio do gráfico de radar da Figura 34.

Tabela 8 - Comparação percentual do Atraso Médio por aproximação

Cenários	Av. José Faria da Rocha (B)	Av. José Faria da Rocha (C)	R. Itália (A)
<b>Atraso médio (s/veíc)</b>			
Existente	0,0%	0,0%	0,0%
Synchro	-33,0%	9,4%	7,8%
Webster	-3,4%	28,3%	11,7%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 34 - Diferença percentual do Atraso Médio



Fonte: Autoria Própria (2023)

As variações mais significativas estão no aumento do atraso de 33,0% no cenário Synchro na aproximação da Av. José Faria da Rocha (B) e redução do atraso de 28,3% no cenário Webster na aproximação (C) da mesma via.

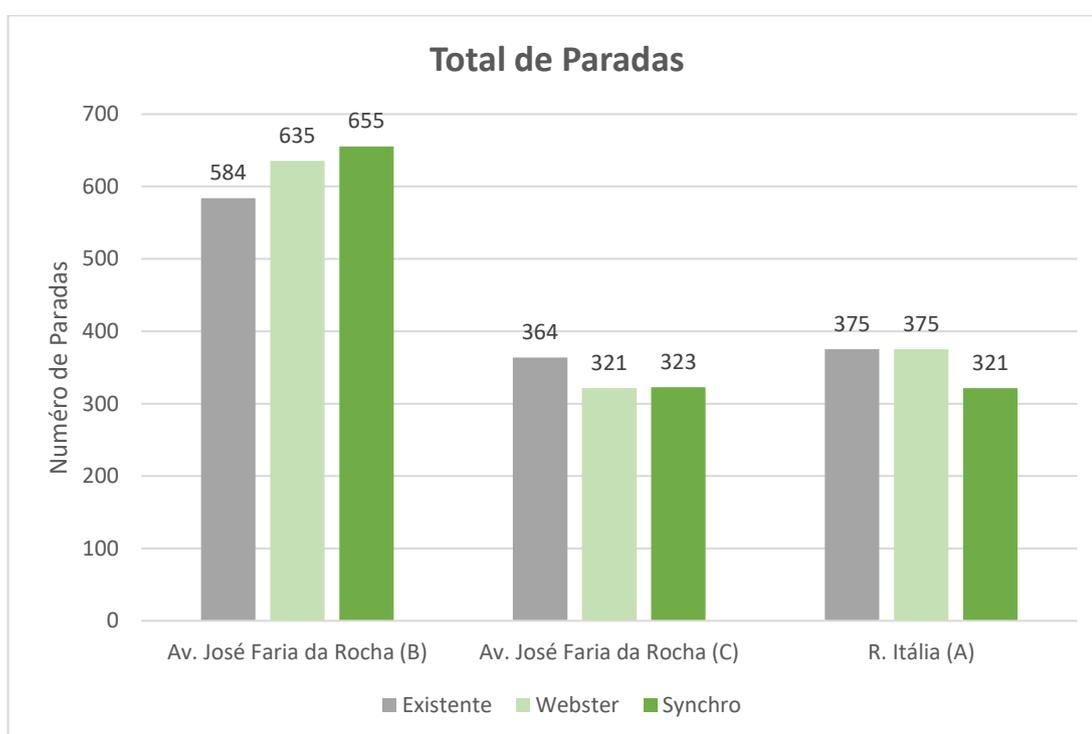
#### 4.3.2 Total de Paradas

O Total de Paradas compreende o número de veículos que realizaram paradas em cada uma das aproximações durante o intervalo de análise. Ao avaliar esta medida de desempenho, quanto menos paradas melhor é o resultado encontrado.

No presente estudo, foi percebida uma piora do Total de Paradas para a aproximação “B” da Av. José Faria da Rocha para ambos os cenários alternativos em relação a situação existente. O ciclo ótimo fornecido para o Synchro produziu melhoras nas demais aproximações enquanto o Webster apresentou melhora para aproximação “C” da Av. José Faria da Rocha e nenhuma variação para R. Itália.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados para esta medida de desempenho, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Gráfico de comparação do Total de Paradas por aproximação



Fonte: Autoria Própria (2023)

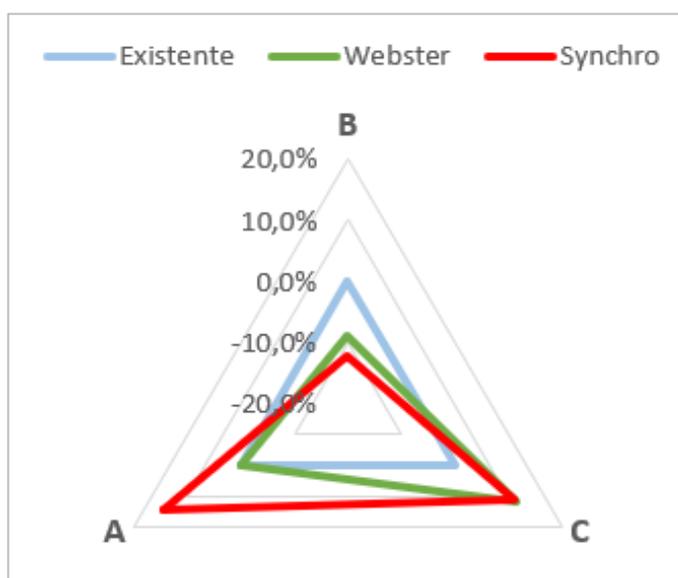
É possível constatar pela análise das diferenças com o cenário existente que o cenário Synchro obteve melhores resultados gerais para esta medida de desempenho. As maiores variações percentuais foram identificadas no cenário Synchro com ganho de desempenho de 14,4% na R. Itália e perda de 12,2% na aproximação “B” da Av. José Faria da Rocha. As diferenças percentuais estão apresentadas na Tabela 9 e a sobreposição dos resultados apresentados por meio do gráfico de radar da Figura 36.

Tabela 9 - Comparação percentual do Total de Paradas por aproximação

Cenários	Av. José Faria da Rocha (B)	Av. José Faria da Rocha (C)	R. Itália (A)
<b>Total de Paradas</b>			
Existente	0,0%	0,0%	0,0%
Synchro	-12,2%	11,3%	14,4%
Webster	-8,8%	11,6%	0,0%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 36 - Gráfico da diferença percentual do Total de Paradas



Fonte: Autoria Própria (2023)

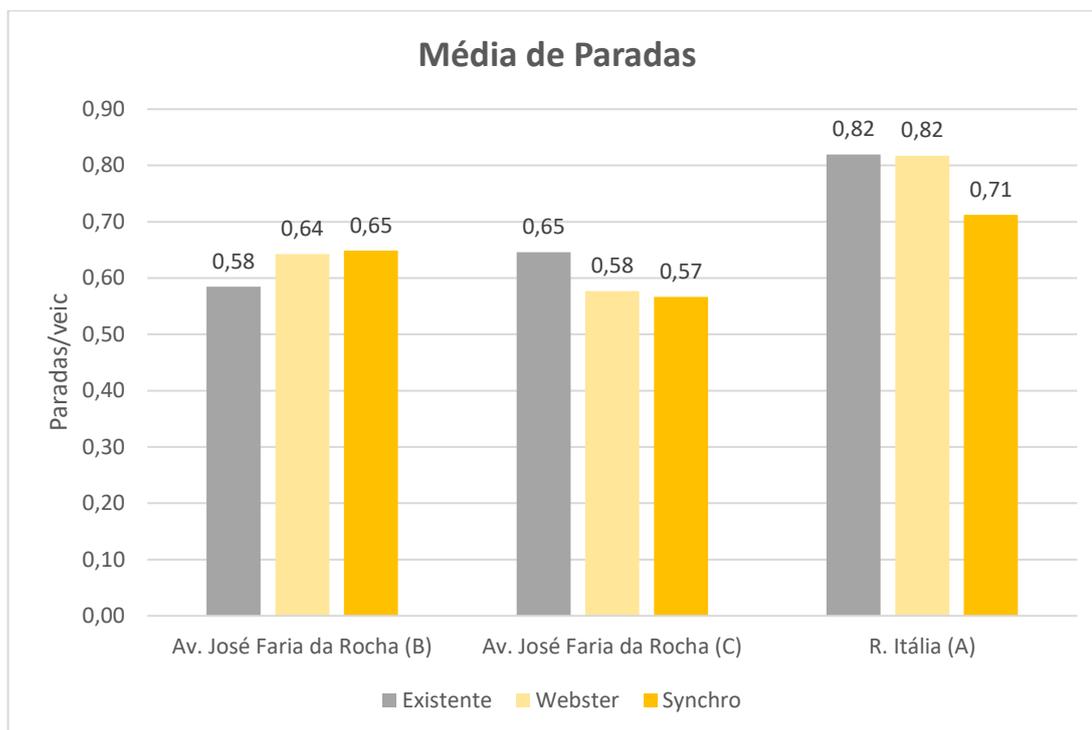
### 4.3.3 Média de Paradas

A média de paradas corresponde a divisão do total de paradas pelo número de veículos que realizou o deslocamento passando pela aproximação da interseção analisada. Quanto menor a Média de Paradas mais veículos passam pela interseção sem ter o deslocamento interrompido pelo controle semafórico.

Assim como as medidas de desempenho anteriormente analisadas, foi observada uma perda de desempenho na Média de Paradas da aproximação “B” da Av. José Faria da Rocha nos cenários alternativos em comparação com o cenário existente. Todavia, foram aferidas melhoras de desempenho nas demais aproximações.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados para esta medida de desempenho, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Gráfico de comparação da Média de Paradas por aproximação



Fonte: Autoria Própria (2023)

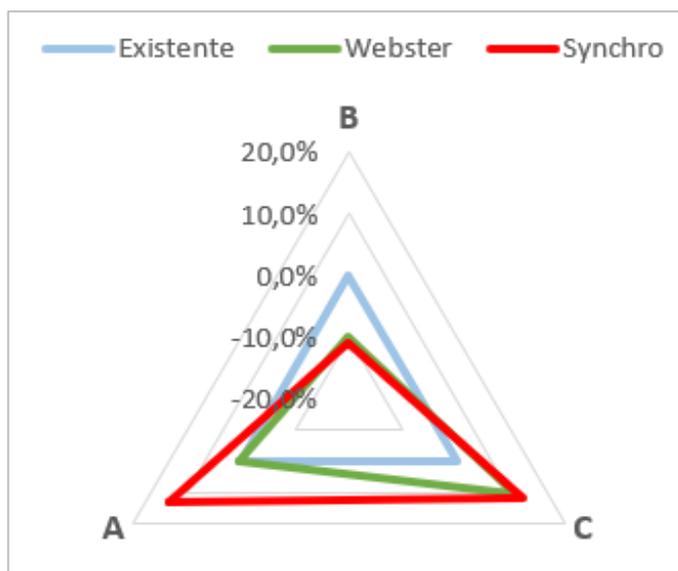
A partir da análise das diferenças dos resultados dos cenários alternativos com o cenário existe, pode-se concluir que a alternativa Synchro obteve melhores resultados que o método de Webster. As maiores variações percentuais foram todas identificadas no cenário Synchro com ganhos de desempenho de 13,1% na R. Itália e 12,3% na Av. José Faria da Rocha (C) e perda de 11,0% na aproximação Av. José Faria da Rocha (B). As diferenças percentuais estão apresentadas na Tabela 10 e a sobreposição dos resultados apresentados por meio do gráfico de radar da Figura 38.

Tabela 10 - Comparação percentual do Média de Paradas por aproximação

Cenários	Av. José Faria da Rocha (B)	Av. José Faria da Rocha (C)	R. Itália (A)
<b>Média de Paradas</b>			
Existente	0,0%	0,0%	0,0%
Synchro	-11,0%	12,3%	13,1%
Webster	-9,9%	10,7%	0,3%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 38 - Diferença percentual da Média de Paradas



Fonte: Autoria Própria (2023)

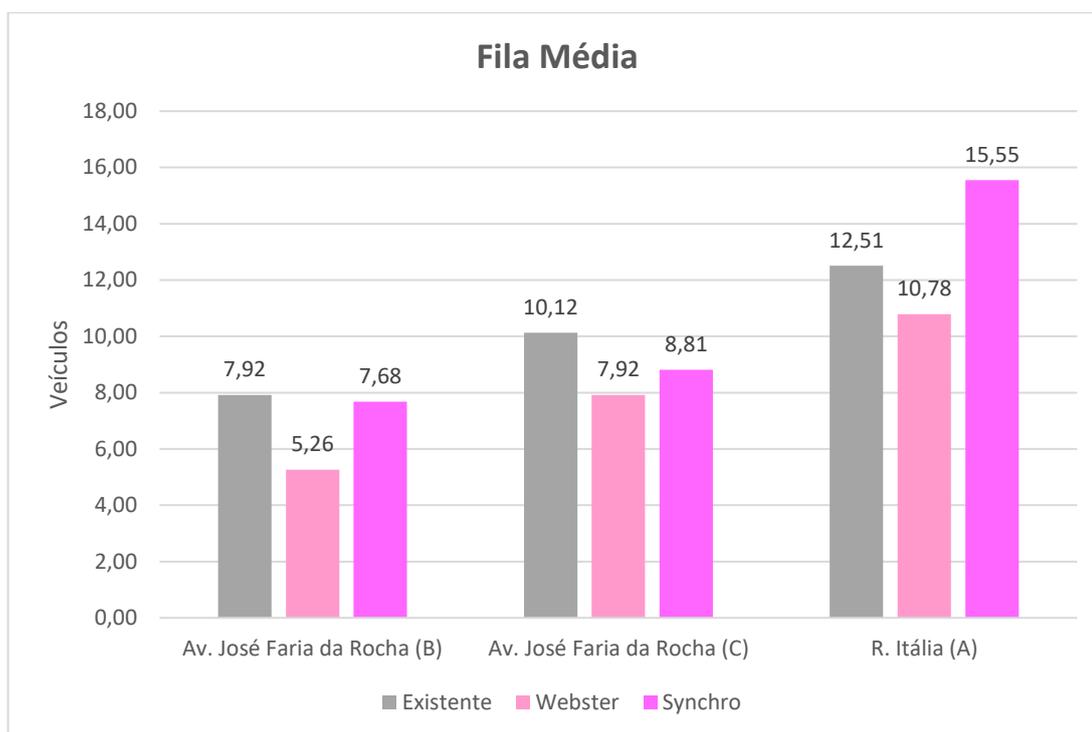
#### 4.3.4 Fila Média

A Fila Média é definida por meio da média aritmética do comprimento das filas em cada faixa de tráfego durante o intervalo de análise e é expressa em número de veículos. No presente estudo, foram calculadas as médias das faixas que compõem cada uma das aproximações. Filas menores demandam menos tempo de verde para serem dissipadas, logo, menores comprimentos médios correspondem a melhores resultados.

O Cenário Webster obteve reduções significativas nas filas médias de todas as aproximações. Por outro lado, o Cenário Synchrono apresentou reduções em ambas as aproximações da Av. José Faria da Rocha e aumento na R. Itália. Todavia, os comprimentos observados não apresentam níveis críticos e os tempos de verde alocados são capazes de dissipá-las.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados para esta medida de desempenho, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Gráfico de comparação da Média de Paradas por aproximação



Fonte: Autoria Própria (2023)

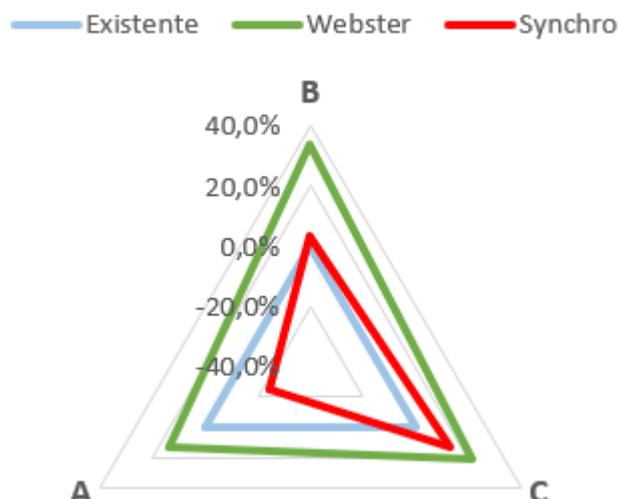
Ao comparar as diferenças percentuais, é possível confirmar que o ciclo ótimo obtido pelo método de Webster apresentou desempenho superior ao Synchro para todas as aproximações. As variações mais significativas em relação ao cenário existente estão na redução da fila em 33,5% no cenário Webster na aproximação da Av. José Faria da Rocha (B) e aumento da fila de 24,4% no cenário Synchro na aproximação da R. Itália. As diferenças percentuais estão descritas na Tabela 11 e a sobreposição dos resultados apresentados por meio do gráfico de radar da Figura 40.

Tabela 11 - Comparação percentual do Fila Média por aproximação

Cenários	Av. José Faria da Rocha (B)	Av. José Faria da Rocha (C)	R. Itália (A)
<b>Fila Média (veic)</b>			
Existente	0,0%	0,0%	0,0%
Synchro	3,1%	12,9%	-24,3%
Webster	33,5%	21,7%	13,8%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 40 - Diferença percentual da Fila Média



Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4.4 RESULTADOS PARA INTERSEÇÃO

Os resultados obtidos para a interseção como um todo, correspondem a uma agregação de todos os resultados calculados para cada faixa de tráfego da interseção. Assim como nas análises feitas por aproximação, os resultados apresentados na Tabela 12 correspondem a média das simulações. Foram obtidos os atrasos médios, nível de serviço, total de paradas, média de paradas e tempo médio parado.

Tabela 12 - Síntese dos resultados para a interseção

Cenários	Atraso Médio (s/veic)	Nível de Serviço (HCM)	Total de Paradas	Média de Paradas	Tempo Médio Parado (s/veic)
Existente	14,37	B	1343	0,67	12,95
Synchro	15,40	B	1299	0,64	13,51
Webster	12,87	B	1332	0,66	11,19

Fonte: Autoria Própria (2023)

Para tornar possível a comparação dos resultados e evidenciar ganhos ou perdas de desempenho entre os cenários, foram calculadas as diferenças percentuais tomando como referência o cenário atual. As diferenças percentuais obtidas para todas as

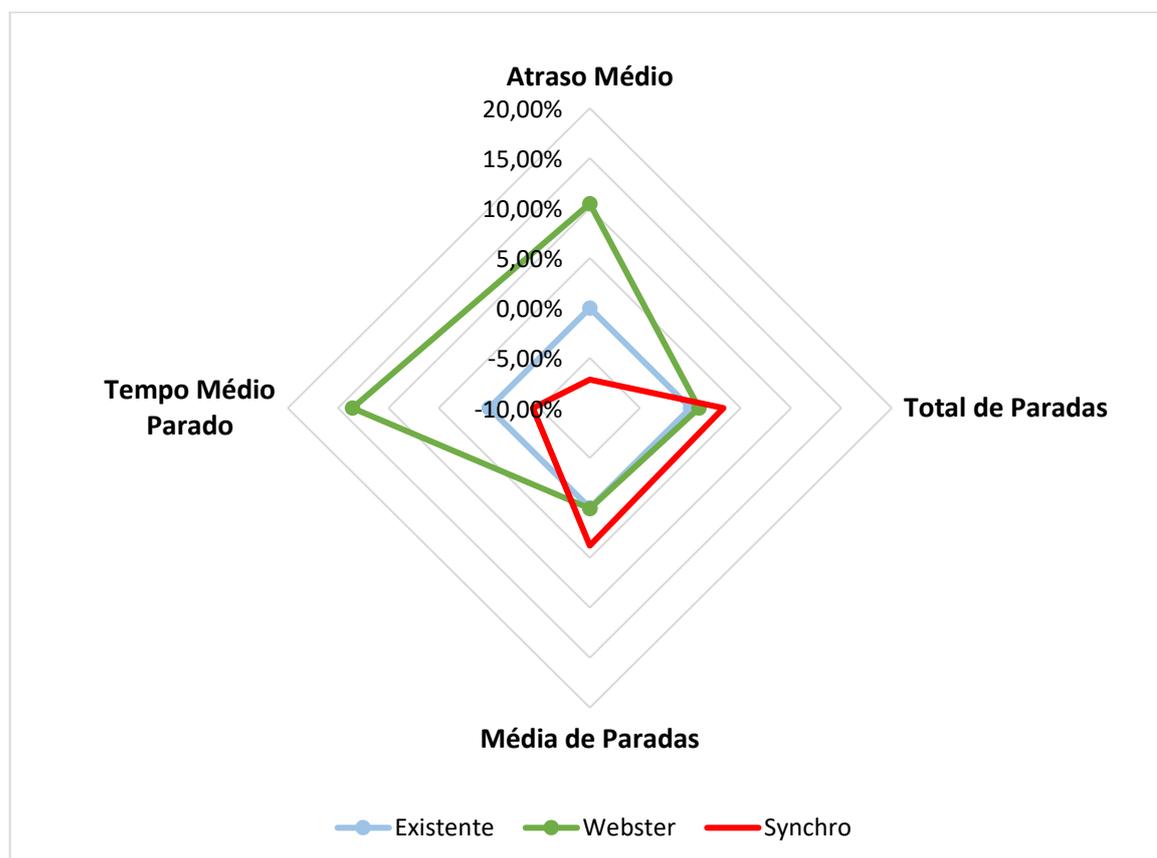
medidas de desempenho analisadas estão indicadas na Tabela 13 e a sobreposição dos resultados apresentados por meio do gráfico de radar da Figura 41.

Tabela 13 - Comparação percentual dos resultados para a interseção

Cenários	Atraso Médio (s/veic)	Total de Paradas	Média de Paradas	Tempo Médio Parado (s/veic)
Existente	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Synchro	-7,16%	3,28%	3,78%	-4,34%
Webster	10,45%	0,84%	0,07%	13,57%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Figura 41 - Diferenças percentuais dos resultados para interseção



Fonte: Autoria Própria (2023)

Ao analisar os resultados agregados, é possível ponderar os impactos produzidos por cada cenário nas aproximações. Observando o Atraso Médio por esta perspectiva é possível identificar uma piora no cenário Synchro de 7,16% que demonstra que para essa medida de desempenho, as reduções de atraso produzidas para a Av. José Faria

da Rocha (C) e R. Itália não foram suficientes para compensar o aumento no atraso produzido na Av. José Faria da Rocha (B), logo, a resultante foi negativa.

Em contrapartida, foi percebido uma melhora no cenário Webster de 10,45%, logo, os benefícios gerados na Av. José Faria da Rocha (C) e R. Itália compensaram e superaram a perda de desempenho na aproximação Av. José Faria da Rocha (B).

Em relação as medidas de desempenho de Total de Paradas e Média de Paradas ambos os cenários alternativos obtiveram melhoras em relação a situação existente. O ciclo obtido a partir do Synchro obteve respectivamente 3,28% e 3,78% de reduções enquanto as variações no ciclo obtido por meio do Método de Webster foram mais discretas, sendo respectivamente 0,84% e 0,07%.

Diferentemente do Atraso Médio, para ambos os casos as reduções das paradas nas aproximações da Av. José Faria da Rocha (C) e R. Itália foram mais positivas que o acréscimo produzido na Av. José Faria da Rocha (B).

Com o objetivo de enriquecer as comparações, também foi apresentada a medida de desempenho de Tempo Médio Parado, que corresponde a média de tempo em espera entre a parada e a retomada de fluxo livre de todos os veículos que passam pela interseção. A avaliação deste parâmetro indica que, apesar do cenário Synchro reduzir o número de paradas o tempo médio em espera dos veículos aumentou em 4,34%. Por outro lado, o cenário Webster conseguiu produzir tempos de esperas menores, mesmo com a redução do número de paradas, registrando variação positiva de 13,57%.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que atualmente a interseção opera em boas condições, o ciclo apresenta bom desempenho e ajuste a realidade local. Estas afirmativas se confirmam com o fato de existirem diferentes ciclos programados para as variações da demanda ao longo dos horários e dias da semana. Além disso, existe uma atenção especial ao pedestre, tendo em vista a elevada circulação de pessoas no local devido às características comerciais da área onde a interseção está localizada.

A taxa de ocupação calculada a partir da relação entre as características geométricas e operacionais da interseção, com os volumes e parâmetros de tráfego pesquisados, demonstram que a interseção opera com baixa saturação. A classificação em relação ao Nível de Serviço indica que a interseção é capaz de operar com ciclos curtos e apresenta boas progressões do tráfego. Na situação existente a aproximação que apresentou os piores resultados corresponde a R. Itália, cujas medidas de desempenho indicam que a fase de verde algumas vezes não é suficiente para dissipar as filas formadas elevando o número de paradas e atraso (HCM, 2016).

Diferente das expectativas, o ciclo alternativo com melhor desempenho resultou da aplicação do Método de Webster. Foram obtidas expressivas reduções de atraso e fila média, em algumas aproximações superiores a 20%. A partir das análises pode-se concluir que a metodologia é capaz de produzir bons resultados para interseções não saturadas confirmando estudos anteriores como exemplo AKGÜNGÖR (2018).

O ciclo mais curto, resultante desse método, apresentou boa distribuição entre os estágios e boa capacidade de dissipar as filas formadas, conseqüentemente produziu os ganhos de desempenho observados. Ademais, quanto menor o ciclo, mais fases de circulação exclusiva serão concedidas aos pedestres dentro do período de análise, logo, é possível afirmar que são apresentadas vantagens para mobilidade ativa nessa condição.

O cenário correspondente ao ciclo otimizado a partir do Synchro não foi capaz de produzir reduções gerais nos atrasos e fila média. Todavia, superou os demais cenários quando comparado pelas medidas de desempenho associadas as paradas.

Este resultado caracteriza o método de otimização do software, que a partir das iterações busca encontrar a melhor performance por meio de um índice que correlaciona atraso e paradas.

A interface do Syncho é amigável e de fácil utilização, além de ser possível desenvolver uma descrição bastante detalhada da situação real. A análise de uma interseção isolada e controlada com tempo fixo configura uma situação bastante abaixo das capacidades de aplicação da ferramenta.

Ambos os cenários alternativos produziram melhoras no desempenho da aproximação da R. Itália, em contrapartida, foram observadas pioras na aproximação com maior volume de tráfego, correspondente a Av. José Faria da Rocha (B).

No mais, é possível dizer que para situações similares, os dois métodos de otimização de ciclos semaforicos configuram bons resultados e um ótimo ponto de partida para identificar a configuração mais adequada a realidade. Porém não dispensam o acompanhamento em campo para refinamento e adequação à situação real da operação planejada.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se avaliar interseções que estejam operando em níveis mais elevados de saturação e/ou uma rede coordenada de semáforos, desta forma, os recursos disponíveis nos softwares de otimização de ciclos semaforicos poderiam ser melhor explorados. Além disso, as análises também podem ser realizadas utilizando outros métodos de otimização, ou levando também em consideração os fluxos de pedestre e ciclistas existentes no local estudado.

A pesquisa exploratória propõe avanços nas aplicações dos métodos de dimensionamento e otimização de ciclos semaforicos e interpretação das medidas de desempenho que caracterizam a operação de uma interseção semaforizada. A otimização do funcionamento dos sistemas viários resulta em impactos positivos na sociedade, uma vez que reduz o tempo despendido com deslocamento, custos do transporte, emissão de poluentes e consumo de combustíveis resultando consequentemente em melhorias da qualidade de vida.

## 6 REFERÊNCIAS

AKÇELİK, Rahmi. **A queue model for HCM 2000**. ARRB Transportation Research Ltd., Vermont South, Australia, 1999.

AKGÜNGÖR, Ali Payıdar; KORKMAZ, Ersin. **Investigating parameter interactions with the factorial design method: Webster's optimal cycle length model**. Tehnički vjesnik, v. 25, n. Supplement 2, p. 391-395, 2018.

ALSHAYEB, Suhaib; STEVANOVIC, Aleksandar; EFFINGER, Justin R. **Investigating impacts of various operational conditions on fuel consumption and stop penalty at signalized intersections**. International Journal of Transportation Science and Technology, 2021.

BARCELÓ, J. et al. **Methodological notes on combining macro, meso and micro models for transportation analysis**. In: Workshop on Modeling and Simulation. 2005.

BARUA, Saurav; MAMUN, Md Mahmud Hasan. **Comparative Study among Different Delay Estimation Models at Signalized Intersection**. UITS Journal of Science & Engineering Volume: 6, Issue: 1, 2017.

BAUER, Christian S. **Some energy considerations in traffic signal timing**. Traffic Engineering, v. 45, n. 2, 1975.

BELO HORIZONTE. Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte - BHTRANS. **Plano de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte: Relatório Final**. Belo Horizonte, 2010

BINNING, James C.; CRABTREE, M. R.; BURTENSHAW, Graham. **TRANSYT 16 user guide**. Transport Research Laboratory, 2019.

CATLING, Ian. **A time-dependent approach to junction delays**. Traffic Engineering & Control, v. 18, n. Analytic, 1977.

CHENG, Cheng et al. **Review on theoretical delay estimation model for signalized intersections**. Transport Reviews, v. 36, n. 4, p. 479-499, 2016.

CHENG, DingXin et al. **Modification of Webster's minimum delay cycle length equation based on HCM 2000**. In: Paper Submitted to the Transportation Research Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington. DC. 2003.

CONTRAN. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – Volume V: Sinalização Semafórica**. Conselho Nacional de Trânsito, Departamento Nacional de Trânsito, Ministério das Cidades, Brasil. 2014.

COURAGE, Kenneth G.; PARAPAR, Servando M. **Delay and fuel consumption at traffic signals**. Traffic Engineering, v. 45, n. 11, 1975.

CRONJE, W. B. **Analysis of existing formulas for delay, overflow, and stops**. Transportation Research Record, v. 905, 1983.

DOROKHIN, Sergey et al. **Traffic simulation: an analytical review**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012058.

FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto et al. **Segurança viária**. São Carlos, SP: Suprema Gráfica e Editora, 2012.

FORNACIARI, Isabela Aparecida. **Investigações no campo da programação semafórica**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2010.

GAZIS, Denos C. **Traffic control: Theory and application**. Traffic science, p. 209-229, 1974.

GIL, Antônio Carlos. **Como classificar as pesquisas. Como elaborar projetos de pesquisa**, v. 4, n. 1, p. 44-45, 2002.

GOMES, Lucas de Carvalho; COSTA, Luís Henrique MK. **Otimização de Semáforos para Tráfego Terrestre com Estratégias Evolutivas**. In: Anais do V Workshop de Computação Urbana. SBC, 2021. p. 140-153

GONZAGA, Eric Wilian Lage. **Otimização da programação semafórica com base em modelos matemáticos**. 2016.

HURLEY, J. W.; BALL, R. P. **Evaluation of Energy-Based Signal Settings for Traffic-Actuated Control. Modeling and Simulation**, v. 10, 1979.

HUSH, D.; ALBECK, J. **Synchro Studio v7. 0 User Guide**. Trafficware Ltd., Sugar Land TX, 2011.

JONES, Steven L. et al. **Traffic simulation software comparison study**. UTCA report, v. 2217, 2004.

JÚNIOR, José Elievam Bessa et al. **CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SIMULADOR TRANSMODELER PARA MODELAGEM DE CORREDORES VIÁRIOS EM CIDADES DE GRANDE PORTE**. XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2017.

K ALOBAIDI, Maan; BADRI, Rawand M.; SALMAN, Mohammed M. **Evaluating the Negative Impact of Traffic Congestion on Air Pollution at Signalized Intersection**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012146.

KOONCE, Peter; RODEGERDTS, Lee. **Traffic signal timing manual**. United States. Federal Highway Administration, 2008.

KWAK, Jaeyoung; PARK, Byungkyu; LEE, Jaesup. **Evaluating the impacts of urban corridor traffic signal optimization on vehicle emissions and fuel consumption**. Transportation Planning and Technology, v. 35, n. 2, p. 145-160, 2012.

LIAO, Tsai-Yun. **A fuel-based signal optimization model**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 23, p. 1-8, 2013.

LIGHTHILL, Michael James; WHITHAM, G. Be. On kinematic waves I. **Flood movement in long rivers. Proceedings of the Royal Society of London**. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 229, n. 1178, p. 281-316, 1955.

LIU, Henry X. et al. **Real-time queue length estimation for congested signalized intersections**. Transportation research part C: emerging technologies, v. 17, n. 4, p. 412-427, 2009.

LU, Ting; SOHR, Alexander; BEI, Xiaoxu. **Comparison of the effectiveness of common cycle computing models**. Procedia-Social and Behavioral Sciences, v. 138, p. 358-367, 2014.

LUNA, M.D.S (2003). **Sobre o fluxo de Saturação: Conceituação, Aplicação, Determinação e Variação**. 132f. Dissertação (Mestrado) – Programa de 135 Mestrado em Engenharia de Transportes - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2003

MAY, Adolf D. **Traffic flow theory-the traffic engineers challenge**. Proc. Inst. Traffic Eng, p. 290-303, 1965.

MICHALOPOULOS, Panos G.; STEPHANOPOULOS, Gregory; STEPHANOPOULOS, George. **An application of shock wave theory to traffic signal control**. Transportation Research Part B: Methodological, v. 15, n. 1, p. 35-51, 1981.

MILLER, Alan J. **Australian road capacity guide: provisional introduction and signalized intersections**. 1968.

NEWELL, Gordon Frank. **Approximation methods for queues with application to the fixed-cycle traffic light**. Siam Review, v. 7, n. 2, p. 223-240, 1965.

PARACHA, Jawad. **Software Choices for Intersection Signals**. Better Roads, v. 69, n. 9, 1999.

PARK, Byungkyu “Brian”; ROUPHAIL, Nagui M.; SACKS, Jerome. **Assessment of stochastic signal optimization method using microsimulation**. Transportation Research Record, v. 1748, n. 1, p. 40-45, 2001.

PARK, Byungkyu et al. **Evaluation of traffic signal timing optimization methods using a stochastic and microscopic simulation program**. Virginia Transportation Research Council, 2003.

RAKHA, Hesham; KANG, Youn-Soo; DION, François. **Estimating vehicle stops at undersaturated and oversaturated fixed-time signalized intersections**. Transportation Research Record, v. 1776, n. 1, p. 128-137, 2001.

RATROUT, Nedal T.; REZA, Imran. **Comparison of optimal signal plans by Synchro & TRANSYT-7F using PARAMICS–A case study**. Procedia Computer Science, v. 32, p. 372-379, 2014.

REIS, Luisa Fernandes; JÚNIOR, José Elievam Bessa. **ANÁLISE DE DIRETRIZES PARA IMPLANTAÇÃO DE SEMÁFOROS EM INTERSEÇÕES URBANAS ATRAVÉS DE MICROSSIMULAÇÃO**. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2020

RESENDE, Paulo de Tarso Vilela; SOUSA, Paulo Renato de. **Mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras: um estudo sobre os impactos do congestionamento**. Fundação do Dom Cabral, SIMPO I, Anais, São Paulo, 2009.

RESENDE, Paulo de Tarso Vilela; SOUSA, Paulo Renato de. **Mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras: um estudo sobre os impactos do congestionamento**. Fundação do Dom Cabral, SIMPO I, Anais, São Paulo, 2009.

ROBERTSON, Dennis I. **Transyt-a traffic network study tool**. trrl report lr 253. London: TRRL, 1969.

SHARMA, Anuj; BULLOCK, Darcy M.; BONNISON, James A. **Input–output and hybrid techniques for real-time prediction of delay and maximum queue length at signalized intersections**. Transportation Research Record, v. 2035, n. 1, p. 69-80, 2007.

SOULEYRETTE, Reginald Roy et al. **Effectiveness of all-red clearance interval on intersection crashes**. 2004.

STEPHANOPOULOS, Gregory; MICHALOPOULOS, Panos G.; STEPHANOPOULOS, George. **Modelling and analysis of traffic queue dynamics at signalized intersections**. Transportation Research Part A: General, v. 13, n. 5, p. 295-307, 1979.

STRONG, Dennis W.; NAGUI, M. R.; COURAGE, Ken. **New calculation method for existing and extended HCM delay estimation procedure**. In: Proceedings of the 87th Annual Meeting Transportation Research Board. 2006.

TRB, **Highway Capacity Manual**. HCM2010. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, v. 1207, 2010.

ULLAH, Muhammad Rehmat et al. **Vehicular traffic simulation software: A systematic comparative analysis**. Pakistan Journal of Engineering and Technology, v. 4, n. 1, p. 66-78, 2021.

VAN AS, S. C. **Overflow delay in signalized networks**. Transportation Research Part A: General, v. 25, n. 1, p. 1-7, 1991.

VENGLAR, S. P.; KOONCE, Peter; URBANIK II, T. **PASSER TM III-98 application and user's guide**. Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX, 1998.

VIGOS, Georgios; PAPAGEORGIU, Markos; WANG, Yibing. **Real-time estimation of vehicle-count within signalized links**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 16, n. 1, p. 18-35, 2008.

VILLALOBOS, Luz Delicia Castillo et al. **Metodologia para otimizar o cálculo de planos para semáforos considerando o atraso e a poluição atmosférica**. 2001.

WEBSTER, F. V. **Traffic signal settings**. Road Research Technical Paper no. 39. Road Research Laboratory, 1958.

WEBSTER, F. V. **Traffic signals**. Road Research Technical Paper, v. 56, 1966.

YANG, Xiao Kuan. **Comparison among computer packages in providing timing plans for Iowa arterial in Lawrence, Kansas**. Journal of Transportation Engineering, v. 127, n. 4, p. 311-318, 2001.

ZHANG, Yunlong; XIE, Yuanchang. **Comparison of PASSER V, Synchro, and TRANSYT-7F for Arterial Signal Timing Based on CORSIM Simulation**. In: Applications of advanced Technology in Transportation. 2006. p. 479-484.

ZHAO, Hongxing; HE, Ruichun; SU, Jiangsheng. **Multi-objective optimization of traffic signal timing using non-dominated sorting artificial bee colony algorithm for unsaturated intersections**. Archives of Transport, v. 46, 2018.

## ANEXO A

RESULTADOS DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS CLASSIFICADAS - CVC																									
Data: 06/12/2022																									
Movimentos: (A-B) (A-C) (A-D) (B-B) (B-C)																									
Intervalo Horário: 00:00 - 08:00																									
Movimentos	A - B					A - C					A - D					B - B					B - C				
	Horário	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus
00:00 às 00:15	2	0	0	0	2	4	1	0	0	5	0	0	0	0	0	4	1	0	0	5	13	1	0	0	14
00:15 às 00:30	2	0	0	0	2	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	11	3	1	0	15
00:30 às 00:45	1	1	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	8	4	0	0	10
00:45 às 01:00	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	7	1	0	0	8
01:00 às 01:15	2	0	0	0	2	3	1	0	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	7
01:15 às 01:30	1	0	0	0	1	2	3	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	8
01:30 às 01:45	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4	3	0	0	6
01:45 às 02:00	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	7
02:00 às 02:15	2	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	2	0	0	8
02:15 às 02:30	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	1	1	13
02:30 às 02:45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6
02:45 às 03:00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	6	0	0	1	8
03:00 às 03:15	0	0	0	0	0	2	0	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	1	0	8
03:15 às 03:30	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
03:30 às 03:45	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	4
03:45 às 04:00	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	4
04:00 às 04:15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	5
04:15 às 04:30	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	3
04:30 às 04:45	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	1	0	4	3	1	0	3	10
04:45 às 05:00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	5
05:00 às 05:15	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	2	1	3	17
05:15 às 05:30	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	6	2	0	1	9
05:30 às 05:45	6	0	0	0	6	7	0	0	0	7	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	15	1	1	7	32
05:45 às 06:00	4	0	0	0	4	14	0	0	1	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	9	0	2	50
06:00 às 06:15	2	0	0	0	2	11	1	1	2	18	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	63	10	2	4	80
06:15 às 06:30	10	1	0	0	11	29	1	0	1	32	4	0	1	0	6	0	0	0	0	0	73	9	0	6	90
06:30 às 06:45	22	2	0	0	23	44	1	0	2	49	5	1	0	0	6	0	0	0	0	0	107	9	4	6	132
06:45 às 07:00	28	4	0	0	30	55	4	0	2	61	6	1	0	0	7	0	1	0	0	1	136	18	1	5	157
07:00 às 07:15	14	3	1	0	18	68	6	0	1	73	9	0	0	0	9	0	1	0	0	1	182	32	1	8	216
07:15 às 07:30	25	3	0	0	27	62	8	0	1	68	10	1	1	0	13	0	1	0	0	1	195	25	6	3	226
07:30 às 07:45	18	1	0	0	19	61	4	0	2	67	8	0	0	0	8	0	0	0	0	0	170	26	4	1	193
07:45 às 08:00	19	0	0	0	19	69	5	0	1	74	7	2	0	0	8	0	0	0	0	0	182	29	5	4	215

RESULTADOS DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS CLASSIFICADAS - CVC																									
Data: 06/12/2022																									
Movimentos: (A-B) (A-C) (A-D) (B-B) (B-C)																									
Intervalo Horário: 08:00 - 16:00																									
Movimentos	A - B					A - C					A - D					B - B					B - C				
	Horário	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus
08:00 às 08:15	24	3	1	0	28	55	6	0	1	60	7	0	0	0	7	1	2	0	0	2	199	33	3	2	226
08:15 às 08:30	29	5	0	0	32	60	3	0	1	64	8	0	0	0	8	0	0	0	0	0	172	15	3	4	194
08:30 às 08:45	18	4	0	0	20	56	5	0	2	63	4	0	0	0	4	0	2	0	0	1	144	18	3	1	161
08:45 às 09:00	42	3	0	0	44	67	9	1	1	76	11	1	0	0	12	0	0	0	0	0	182	11	3	1	196
09:00 às 09:15	26	8	0	0	30	64	6	0	0	67	10	0	0	0	10	0	3	0	0	2	158	18	4	3	181
09:15 às 09:30	28	5	0	0	31	39	5	2	1	48	8	0	0	0	8	0	0	0	0	0	177	20	4	4	203
09:30 às 09:45	33	7	1	0	39	75	6	3	1	86	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	156	4	4	1	168
09:45 às 10:00	35	5	0	0	38	68	2	3	1	77	11	1	2	0	16	0	0	0	0	0	149	14	5	2	170
10:00 às 10:15	35	1	2	0	40	60	4	3	0	68	9	2	1	0	12	0	2	0	0	1	177	17	4	0	194
10:15 às 10:30	40	4	0	0	42	53	4	1	1	59	12	1	0	0	13	0	1	0	0	1	193	11	14	1	229
10:30 às 10:45	37	7	1	0	43	56	6	1	0	61	9	1	0	0	10	0	0	0	0	0	167	16	6	4	195
10:45 às 11:00	39	6	0	0	42	48	4	2	1	56	7	0	0	0	7	0	2	0	0	1	186	24	4	1	208
11:00 às 11:15	35	10	0	0	40	43	8	0	0	47	9	1	1	0	12	0	0	0	0	0	184	23	7	1	212
11:15 às 11:30	37	3	1	0	41	60	5	3	1	71	8	1	0	0	9	0	0	0	0	0	192	17	5	3	217
11:30 às 11:45	36	2	1	0	39	72	8	1	1	80	9	1	0	0	10	0	1	0	0	1	187	30	6	2	218
11:45 às 12:00	37	1	1	0	40	60	6	1	0	65	7	0	1	0	9	0	1	0	0	1	183	21	5	2	208
12:00 às 12:15	52	9	1	0	59	60	7	1	1	68	12	0	0	0	12	0	1	0	0	1	216	27	6	0	242
12:15 às 12:30	17	4	0	0	19	61	7	2	1	71	6	0	0	0	6	0	2	0	0	1	197	21	3	3	220
12:30 às 12:45	26	8	0	0	30	61	8	1	1	69	7	2	0	0	8	0	0	0	0	0	183	22	3	2	204
12:45 às 13:00	48	7	0	0	52	70	4	1	0	74	11	2	0	0	12	0	0	0	0	0	212	26	5	0	235
13:00 às 13:15	40	3	1	0	44	66	5	0	1	71	10	3	0	0	12	0	2	0	0	1	201	32	10	1	239
13:15 às 13:30	36	9	0	0	41	63	8	2	1	73	5	0	1	0	7	0	2	0	0	1	193	23	4	2	217
13:30 às 13:45	29	6	0	0	32	68	9	1	0	75	5	0	1	0	7	0	1	0	0	1	170	24	3	3	194
13:45 às 14:00	22	5	0	0	25	48	3	0	1	52	7	1	0	0	8	0	0	0	0	0	183	19	5	2	207
14:00 às 14:15	39	4	1	0	43	59	5	2	1	68	13	0	2	0	17	0	0	0	0	0	183	33	6	1	214
14:15 às 14:30	32	9	0	0	37	61	2	1	0	64	14	0	0	0	14	0	1	0	0	1	193	24	3	1	213
14:30 às 14:45	29	5	0	0	32	59	1	2	0	64	6	0	0	0	6	0	0	0	0	0	177	18	7	1	202
14:45 às 15:00	28	4	0	0	30	59	7	1	1	67	9	0	0	0	9	0	2	0	0	1	192	32	2	1	214
15:00 às 15:15	37	5	0	0	40	51	11	1	0	59	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	172	13	2	1	185
15:15 às 15:30	36	6	0	0	39	40	5	0	1	45	12	0	0	0	12	0	2	0	0	1	186	26	3	5	215
15:30 às 15:45	36	9	1	0	43	62	5	1	0	67	7	2	0	0	8	0	1	0	0	1	175	24	3	3	199
15:45 às 16:00	37	7	1	0	43	59	5	1	1	66	15	0	0	0	15	0	1	0	0	1	177	23	7	2	

RESULTADOS DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS CLASSIFICADAS - CVC																									
Data: 06/12/2022		Movimentos: (A-B) (A-C) (A-D) (B-B) (B-C)												Intervalo Horário: 16:00 - 24:00											
Movimentos	A - B					A - C					A - D					B - B					B - C				
	Horário	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus
16:00 às 16:15	36	5	1	0	41	57	4	0	1	61	9	0	0	0	9	0	0	0	0	0	178	19	5	2	202
16:15 às 16:30	34	6	1	0	39	51	3	0	3	59	5	1	0	0	6	0	3	0	0	2	195	19	7	4	227
16:30 às 16:45	49	4	0	0	51	49	9	1	1	58	4	2	0	0	5	0	2	0	0	1	167	18	4	2	188
16:45 às 17:00	35	7	1	0	41	59	6	2	1	68	6	0	0	0	6	0	1	0	0	1	167	18	6	5	198
17:00 às 17:15	49	5	0	0	52	71	6	0	1	76	9	2	0	0	10	1	3	0	0	3	231	38	4	2	262
17:15 às 17:30	35	13	0	0	42	59	10	1	2	70	11	1	0	0	12	0	2	0	0	1	220	25	3	2	243
17:30 às 17:45	34	10	0	0	39	71	7	1	1	79	6	0	0	0	6	1	1	0	0	2	237	32	1	0	255
17:45 às 18:00	32	11	0	0	38	63	7	0	0	67	3	1	0	0	4	0	1	0	0	1	236	29	4	3	265
18:00 às 18:15	43	11	1	0	51	64	7	0	2	72	13	2	0	0	14	0	0	0	0	0	245	29	4	3	274
18:15 às 18:30	36	7	0	0	40	61	9	1	1	70	13	0	0	0	13	0	4	0	0	2	220	22	1	2	237
18:30 às 18:45	38	10	1	0	45	82	4	1	1	88	6	0	0	0	6	0	1	0	0	1	195	21	1	3	214
18:45 às 19:00	44	4	0	0	46	64	5	0	1	69	6	1	0	0	7	0	0	0	0	0	208	19	1	0	220
19:00 às 19:15	38	5	0	0	41	67	9	1	0	74	8	2	0	0	9	0	0	0	0	0	189	28	3	1	211
19:15 às 19:30	34	10	0	0	39	57	3	0	2	63	6	0	0	0	6	0	1	0	0	1	147	17	1	1	160
19:30 às 19:45	23	6	0	0	26	51	5	1	0	56	6	0	0	0	6	0	0	0	0	0	147	17	0	3	162
19:45 às 20:00	20	5	0	0	23	34	6	0	1	39	3	0	0	0	3	0	1	0	0	1	116	13	3	1	131
20:00 às 20:15	19	5	0	0	22	28	11	0	1	36	6	1	0	0	7	2	0	0	0	2	114	19	1	3	132
20:15 às 20:30	12	6	0	0	15	31	4	0	1	35	7	0	0	0	7	0	2	0	0	1	107	16	1	1	119
20:30 às 20:45	11	1	0	0	12	22	2	0	0	23	2	0	0	0	2	2	1	0	0	3	98	14	0	0	105
20:45 às 21:00	11	2	0	0	12	17	9	0	0	22	2	0	0	0	2	0	0	1	0	2	103	9	1	5	120
21:00 às 21:15	16	3	0	0	18	20	3	0	1	24	4	0	0	0	4	0	1	0	0	1	90	18	1	4	109
21:15 às 21:30	12	6	0	0	15	18	4	0	0	20	3	0	0	0	3	0	1	0	0	1	65	12	1	3	79
21:30 às 21:45	6	3	0	0	8	21	5	0	0	24	2	0	0	0	2	0	1	0	0	1	69	19	1	2	85
21:45 às 22:00	16	3	0	0	18	23	4	0	0	25	1	1	0	0	2	0	3	0	0	2	67	12	0	2	77
22:00 às 22:15	7	0	0	0	7	19	4	0	1	23	1	0	0	0	1	3	0	0	0	3	60	12	1	2	72
22:15 às 22:30	2	4	0	0	4	10	3	0	0	12	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	56	5	0	1	61
22:30 às 22:45	8	2	0	0	9	14	3	0	0	16	1	0	0	0	1	0	3	0	0	2	43	12	1	1	53
22:45 às 23:00	4	0	0	0	4	9	3	0	1	13	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	41	5	1	0	46
23:00 às 23:15	22	1	0	0	23	9	2	0	0	10	1	0	0	0	1	2	0	0	0	2	20	11	0	1	28
23:15 às 23:30	6	3	0	0	8	2	2	0	0	3	2	0	0	0	2	1	1	0	0	2	25	6	0	2	32
23:30 às 23:45	5	0	0	0	5	12	0	0	1	14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	19	5	1	2	28
23:45 às 00:00	0	0	0	0	0	3	2	0	1	6	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	21	3	1	0	25
<b>TOTAL</b>	<b>1.973</b>	<b>350</b>	<b>19</b>	<b>0</b>	<b>2.186</b>	<b>3.557</b>	<b>376</b>	<b>49</b>	<b>61</b>	<b>3.965</b>	<b>485</b>	<b>41</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>528</b>	<b>33</b>	<b>68</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>71</b>	<b>11.200</b>	<b>1.416</b>	<b>240</b>	<b>181</b>	<b>12.750</b>

RESULTADOS DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS CLASSIFICADAS - CVC																									
Data: 06/12/2022		Movimentos: (B-D) (C-B) (C-D) (D-C)												Intervalo Horário: 00:00 - 08:00											
Movimentos	B - D					C - B					C - D					D - C					TOTAL				
	Horário	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus
00:00 às 00:15	0	0	0	0	0	10	5	0	0	13	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	34	0	38	8	8
00:15 às 00:30	1	0	0	0	1	7	3	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	1	32	7	7
00:30 às 00:45	0	0	0	0	0	9	2	0	0	10	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	23	0	27	7	7
00:45 às 01:00	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	13	1	1
01:00 às 01:15	0	0	0	0	0	8	1	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	23	2	3
01:15 às 01:30	0	0	0	0	0	5	3	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	19	11	11
01:30 às 01:45	0	0	0	0	0	3	1	0	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	13	6	7
01:45 às 02:00	0	0	0	0	0	6	0	1	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	1	19	1	2
02:00 às 02:15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	12	2	2
02:15 às 02:30	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	1	21	1	2
02:30 às 02:45	0	0	0	0	0	4	1	1	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	1	15	2	3
02:45 às 03:00	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	8	1	14	4	5
03:00 às 03:15	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	2	13	5	5
03:15 às 03:30	1	0	0	0	1	2	2	1	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	6	1	10	4	4
03:30 às 03:45	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	9	1	3
03:45 às 04:00	0	0	1	0	2	5	0	1	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	2	15	3	3
04:00 às 04:15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	6	0	1
04:15 às 04:30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	5	1	1
04:30 às 04:45	1	0	0	0	1	3	2	0	3	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	1	27	4	10
04:45 às 05:00	0	0	0	0	0	6	1	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	1	15	2	3
05:00 às 05:15	0	0	1	0	2	4	1	2	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	4	32	7	11
05:15 às 05:30	0	0	0	0	0	5	3	2	1	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	2	27	7	9
05:30 às 05:45	2	0	0	0	2	20	1	1	1	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52	2	73	4	12
05:45 às 06:00	4	2	0	0	5	20	3	0	1	24	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	84	0	99	12	18
06:00 às 06:15	4	1	0	0	5	41	2	0	0	42	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	123	4	150	17	24
06:15 às 06:30	9	2	0	0	10	47	10	0	1	54	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	173	1	203	21	31
06:30 às 06:45	11	2	0	0	12	99	12	1	0	107	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288	5	328	28	38
06:45 às 07:00	8	2	0	0	9	120	22	1	1	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	353	2	399	48	58
07:00 às 07:15	24	6	0	0	27	122	16	4	1	140	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	419	6	484	62	78
07:15 às 07:30	16	1	0	0	17	110	17	2	0	123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	418	9	472	61	66
07:30 às 07:45	6	1	0	0	7	129	25	2	0	146	0	0	0	0	0										

RESULTADOS DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS CLASSIFICADAS - CVC																											
Data: 06/12/2022					Movimentos: (B-D) (C-B) (C-D) (D-C)										Intervalo Horário: 08:00 - 16:00												
Movimentos	B - D					C - B					C - D					D - C					TOTAL						
	Horário	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	
08:00 às 08:15	23	5	0	0	26	124	21	2	1	141	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	433	6	489	69	78
08:15 às 08:30	13	2	0	0	14	120	9	2	0	129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	402	5	439	32	39
08:30 às 08:45	18	0	0	0	18	121	18	4	0	138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	361	7	405	50	53
08:45 às 09:00	24	0	0	0	24	133	20	5	2	157	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	459	9	507	50	54
09:00 às 09:15	25	2	0	0	26	126	22	4	1	147	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	409	8	463	57	63
09:15 às 09:30	20	3	0	0	22	133	15	2	0	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	405	8	455	48	56
09:30 às 09:45	24	3	0	0	26	131	12	5	0	147	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	429	13	475	35	40
09:45 às 10:00	24	1	0	0	25	111	13	3	0	124	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	399	13	449	43	47	
10:00 às 10:15	38	1	2	0	43	135	14	5	0	152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	454	17	509	56	57
10:15 às 10:30	23	0	2	0	27	123	7	6	0	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	444	23	508	47	49
10:30 às 10:45	23	1	1	0	26	110	20	8	0	136	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	402	17	470	60	65
10:45 às 11:00	27	1	1	0	30	131	11	4	0	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	438	11	488	52	55
11:00 às 11:15	28	1	0	0	29	125	17	5	0	144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	424	13	482	62	64
11:15 às 11:30	23	5	0	0	26	118	15	2	0	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	438	11	491	49	58
11:30 às 11:45	19	1	0	0	20	131	13	4	0	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	454	12	512	65	69
11:45 às 12:00	11	0	0	0	11	126	18	2	0	139	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	427	10	475	56	58
12:00 às 12:15	24	1	0	0	25	111	15	6	0	131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	475	14	535	64	66
12:15 às 12:30	29	2	2	0	34	121	10	2	0	130	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	432	9	481	49	55	
12:30 às 12:45	22	2	0	0	23	124	20	3	0	140	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	424	7	475	59	64	
12:45 às 13:00	24	2	0	0	25	138	24	2	0	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	503	8	552	64	66
13:00 às 13:15	31	1	3	0	38	135	14	5	1	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	483	19	557	75	79
13:15 às 13:30	30	1	0	0	31	118	19	3	0	134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	445	10	502	62	66
13:30 às 13:45	46	2	0	0	47	110	17	7	0	133	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	429	12	489	63	68	
13:45 às 14:00	28	3	0	0	30	128	16	4	1	146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	416	9	466	48	55
14:00 às 14:15	22	1	0	0	23	114	21	4	1	135	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	431	15	499	74	78	
14:15 às 14:30	27	0	0	0	27	137	21	2	0	152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	464	6	507	54	55
14:30 às 14:45	17	0	0	0	17	119	15	2	1	133	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	408	11	454	45	47	
14:45 às 15:00	20	2	1	0	23	111	19	1	0	123	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	420	5	467	65	69
15:00 às 15:15	22	4	0	0	24	134	14	6	0	153	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	426	9	470	48	53
15:15 às 15:30	15	2	0	0	16	119	16	4	2	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	408	7	467	56	66
15:30 às 15:45	19	1	0	0	20	121	19	2	2	139	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	2	422	7	477	59	65	
15:45 às 16:00	16	0	0	0	16	120	14	4	0	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	424	13	481	56	59

RESULTADOS DAS CONTAGENS VOLUMÉTRICAS CLASSIFICADAS - CVC																											
Data: 06/12/2022					Movimentos: (B-D) (C-B) (C-D) (D-C)										Intervalo Horário: 16:00 - 24:00												
Movimentos	B - D					C - B					C - D					D - C					TOTAL						
	Horário	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	Car.	Mot.	Cam.	Bus	UVP	
16:00 às 16:15	20	2	0	0	21	118	14	14	2	157	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	420	20	492	57	64	
16:15 às 16:30	9	1	0	0	10	115	22	4	0	134	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	410	12	476	60	68	
16:30 às 16:45	12	2	0	0	13	101	13	2	1	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	382	7	429	51	57
16:45 às 17:00	17	4	0	0	19	121	15	4	1	139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	405	13	471	53	64
17:00 às 17:15	18	1	1	0	21	132	26	1	1	149	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	512	6	573	82	87	
17:15 às 17:30	10	1	0	0	11	133	27	3	4	161	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	468	7	538	73	82	
17:30 às 17:45	23	2	0	0	24	132	20	3	0	148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	504	5	552	65	68
17:45 às 18:00	18	0	1	0	20	133	26	1	1	150	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	485	6	543	71	75	
18:00 às 18:15	16	3	0	0	18	129	33	1	1	150	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	511	6	578	77	86
18:15 às 18:30	7	3	0	0	9	124	25	3	0	143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	461	5	512	65	71
18:30 às 18:45	14	1	0	0	15	125	26	0	0	138	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	461	3	507	56	61	
18:45 às 19:00	15	3	0	0	17	125	22	0	3	142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	462	1	499	48	55
19:00 às 19:15	8	1	0	0	9	120	17	1	0	131	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	430	5	474	62	64	
19:15 às 19:30	7	3	0	0	9	83	11	2	0	93	1	1	0	0	2	0	1	0	0	0	1	335	3	371	37	43	
19:30 às 19:45	10	0	0	0	10	105	14	1	0	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	342	2	373	38	41
19:45 às 20:00	7	0	0	0	7	88	10	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	268	3	296	33	35
20:00 às 20:15	8	0	0	0	8	84	12	1	0	92	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	261	2	298	47	51	
20:15 às 20:30	12	0	0	0	12	73	13	1	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	242	2	271	37	39
20:30 às 20:45	9	2	0	0	10	52	11	1	1	62	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	197	1	217	29	32
20:45 às 21:00	8	0	0	0	8	61	12	2	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	202	4	236	34	39
21:00 às 21:15	3	0	1	0	5	55	9	1	0	62	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	190	3	223	34	39	
21:15 às 21:30	3	0	0	0	3	51	9	0	0	56	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	152	1	177	28	31
21:30 às 21:45	12	1	0	0	13	47	13	1	0	56	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	159	2	188	40	43	
21:45 às 22:00	7	0	0	0	7	36	10	0	0	41	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	152	0	173	30	32	
22:00 às 22:15	3	1	0	0	4	47	8	1	0	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	2	163	26	30
22:15 às 22:30	0	2	0	0	1	34	10	0	0	39	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	103	0	118	20	23
22:30 às 22:45	3	1	0	0	4	22	14	0	0	29	2	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	93	1	115	34	36