

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIDADES INTELIGENTES E  
SUSTENTÁVEIS**

**EIDY REGINA MARCÍLIO CAVALHEIRO**

**O USO DE SEMÁFOROS INTELIGENTES COMO INSTRUMENTO NO  
COMBATE À CRISE DE MOBILIDADE URBANA:  
UMA ANÁLISE DA CIDADE DE SÃO PAULO**

**São Paulo**

**2021**

**EIDY REGINA MARCÍLIO CAVALHEIRO**

**O USO DE SEMÁFOROS INTELIGENTES COMO INSTRUMENTO NO  
COMBATE À CRISE DE MOBILIDADE URBANA:  
UMA ANÁLISE DA CIDADE DE SÃO PAULO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis**.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma.

**São Paulo**

**2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

/

Cavalheiro, Eidy Regina Marcílio.

O uso de semáforos inteligentes como instrumento no combate à crise de mobilidade urbana: uma análise da cidade de São Paulo. / Eidy Regina Marcílio Cavalheiro. 2021.

155 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2021.

Orientador (a): Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma.

1. Semáforos tempo real. 2. Tecnologia semafórica. 3. Cidades inteligentes.

I. Quaresma, Cristiano Capellani. II. Título.

CDU 711.4

**O USO DE SEMÁFOROS INTELIGENTES COMO INSTRUMENTO NO  
COMBATE À CRISE DE MOBILIDADE URBANA:  
UMA ANÁLISE DA CIDADE DE SÃO PAULO**

**Por**

**EIDY REGINA MARCÍLIO CAVALHEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, apresentada à Banca Examinadora formada por:

---

Orientador Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

---

Membro Interno Profa. Dra. Heidy Rodriguez Ramos – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

---

Membro Externo Prof. Dr. Diego de Melo Conti – PUC-Campinas

São Paulo, 18 de março de 2021.

Dedico esta pesquisa a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada, não havendo melhor exemplo para isto do que a minha família.

Aos meus pais, Edson e Eva (in memoriam), a quem agradeço as bases que me deram para me tornar quem sou hoje.

Ao meu marido Léo pelo apoio, compreensão e suporte.

Aos meus filhos Felipe e Gabriel pela ajuda, incentivo e admiração constantes.

À minha irmã Elaine, por sempre me estimular na carreira acadêmica.

Amo vocês.

## AGRADECIMENTOS

O trabalho aqui apresentado não teria sido possível sem a orientação e assistência de muitas pessoas especiais. Sem estabelecer ordem de importância, gostaria de agradecer a cada um por todo o apoio e incentivo apresentados durante minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma pelo conhecimento compartilhado e pelas orientações fornecidas.

Aos professores que me acompanharam e despertaram minha paixão pela pesquisa, destacando Profa. Dra. Heidy Rodriguez Ramos, Prof. Dr. Diego de Melo Conti, Profa. Dra. Claudia Terezinha Kniess, Prof. Dr. José Ricardo Marar, Prof. Dr. Leonardo Vils, Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma.

Aos amigos do PPG-CIS/2018 e PPG-CIS/2019 que tornaram essa jornada mais leve e rica. Às excelentes consultorias fornecidas por Virgílio dos Santos e João Cucci Neto.

Aos membros da minha banca, Prof. Dr. Heidy Rodriguez Ramos e Prof. Dr. Diego de Melo Conti, por sua dedicação e conselhos.

Por fim, aos entrevistados que tanto enriqueceram esta pesquisa.

## **RESUMO**

O processo de urbanização brasileiro caracterizou-se por ser tardio, acelerado e desigual. Tais características, associadas à ausência de planejamento, geraram uma série de problemas urbanos, dentre os quais a denominada crise de mobilidade. Diante deste quadro e das possibilidades do atual desenvolvimento técnico-científico, soluções tecnológicas inovadoras têm sido adotadas por outras metrópoles do mundo com vias ao combate desta crise, a exemplo daquelas relacionadas ao controle inteligente semafórico. Entretanto, a cidade de São Paulo, apesar de ter iniciado o uso destas tecnologias na década de 1980, não faz mais uso no período atual. Tendo em vista as comprovadas melhorias relacionadas ao uso deste tipo de tecnologia para a mobilidade urbana das cidades, bem como à sua gradual e frequente evolução em outras metrópoles ao redor do mundo, o presente estudo buscou analisar o contexto de adoção e desuso de tecnologia de controle semafórico inteligente na cidade de São Paulo, bem como a viabilidade da retomada do uso deste tipo de tecnologia. Trata-se de uma pesquisa exploratória de cunho qualitativo, baseada em análise de conteúdo e da triangulação de informações oriundas de pesquisa bibliográfica, revisão sistemática de literatura, análise documental e entrevistas junto a especialistas. Estas, após devida transcrição, foram analisadas por meio do software ATLAS.ti. Os resultados apontam para a ausência de uma adequada manutenção preventiva e contínua como um dos grandes motivadores do desuso dos semáforos inteligentes na cidade de São Paulo, somada às questões político-administrativas e ao gigantismo da operação. Adicionalmente, esta pesquisa resultou em uma série de propostas para a melhoria da mobilidade e, de maneira específica, para a retomada do uso da tecnologia semafórica em São Paulo. Estas propostas concentram-se em ações relacionadas ao planejamento urbano, racionalização do uso e ocupação do solo, estratégias a longo prazo relacionadas à melhoria do tráfego, aplicação de conceitos de gerenciamento de projetos para a implementação dos controles semafóricos e, finalmente, análise da solução ideal para cada cenário distinto. Espera-se que os resultados ora apresentados contribuam para futuras políticas públicas voltadas para a solução dos problemas de mobilidade urbana existentes na cidade de São Paulo.

### **Palavras-chave:**

Semáforos tempo real; Tecnologia Semafórica; Cidades Inteligentes

## **ABSTRACT**

The Brazilian urbanization process was defined as late, fast paced and uneven. Those characteristics linked with the lack of planning resulted in a series of urban issues among which the so-called mobility crisis. Taking into account, those issues and the current technical-scientific development, innovative technological solutions have been adopted by other metropolises in the world with ways to combat this crisis, an example of those related to smart traffic light control. However, the city of São Paulo, despite having started the use of these technologies in the 1980's decade, has discontinued its use. Given the known betterment and advancement of this type of technology for urban mobility in cities, as well as its gradual and frequent usage among other metropolises, this study aims to analyze the context of adoption and disuse of smart traffic control technology in the city of São Paulo, and also the feasibility of resuming the use of this type of technology. The methodology used in the study is a qualitative exploratory research, content analysis and the triangulation of information from bibliographic research, systematic literature review, documentary analysis, and interviews with specialists. After due transcription, those interviews were analyzed using the ATLAS.ti software. The results point that lack of continuous and preventive maintenance was one of the key factors leading to the discontinued use of smart traffic lights in the city of São Paulo, in addition to the political-administrative issues and the giganticness of the operation. Furthermore, this research resulted in a series of proposals for the betterment of mobility, specifically regarding the return of traffic lights technologies in the city of São Paulo. These proposals focus mainly on the urban planning sphere, rationalization of land use and occupation, long term strategies for traffic improvement, application of project management concepts in the implementation of traffic light control, and most importantly analyze the best solution for each individual scenario. The results are now expected to contribute to future public policies aimed at solving the urban mobility problems existing in the city of São Paulo.

### **Keywords:**

Smart traffic light; Traffic light technology, Smart cities

## LISTA DE FIGURAS:

- Figura 1:** Proporção da população residente, por situação do domicílio – 1950/ 2010.
- Figura 2:** Taxa de urbanização- Cenário econômico 2050.
- Figura 3:** Variação do volume de trânsito (dias de semana).
- Figura 4:** Diagrama de estágios.
- Figura 5:** Ciclo Semafórico.
- Figura 6:** Variação do volume de trânsito (semanas).
- Figura 7:** Esquema de controle de semáforo em tempo real.
- Figura 8:** Alteração dos tempos semafóricos.
- Figura 9:** Gráfico de comparação Tempos Fixos x Tempo Real.
- Figura 10:** Exemplos de soluções intituladas equivocadamente como semáforos inteligentes.
- Figura 11:** Exemplos de implementações de semáforos inteligentes no Brasil.
- Figura 12:** Fases da pesquisa.
- Figura 13:** Framework da Revisão Sistemática de Literatura.
- Figura 14:** Códigos, Categorias e Subcategorias.
- Figura 15:** Gerenciador de citação.
- Figura 16:** Gerenciador de códigos.
- Figura 17:** Ocorrência de estudos por ano.
- Figura 18:** Distribuição dos estudos por países.
- Figura 19:** Frequência dos temas nas entrevistas.
- Figura 20:** Agrupamento de códigos e subcategorias de Motivação.
- Figura 21:** Frequência das citações do tema Motivação.
- Figura 22:** Agrupamento de códigos e subcategorias de Benefícios.
- Figura 23:** Frequência das citações do tema Benefícios.
- Figura 24:** Agrupamento de códigos e subcategorias de Barreiras e Dificuldades.
- Figura 25:** Frequência das citações do tema Barreiras e Dificuldades.
- Figura 26:** Concentração dos temas.
- Figura 27:** Agrupamento de códigos e subcategorias de Tecnologias.
- Figura 28:** Frequência das citações do tema Tecnologias.
- Figura 29:** Modelo de intersecção (monodirecional) considerada no estudo.
- Figura 30:** Modelo de intersecção (monodirecional) considerada no estudo.
- Figura 31:** Proposta de configuração do Sensor.
- Figura 32:** Modelo de instalação de múltiplos sensores considerados no estudo.
- Figura 33:** Modelo de intersecção considerado no estudo.
- Figura 34:** Veículo para veículo (*V2V*).
- Figura 35:** Veículo para rede (*V2N*).
- Figura 36:** Veículo para infraestrutura (*V2I*).
- Figura 37:** Arquiteturas de objetos conectados ao tráfego.
- Figura 38:** Procedimento de avaliação da demanda de veículos.
- Figura 39:** Procedimento de avaliação da demanda de veículos.

## **LISTA DE TABELAS:**

**Tabela 1:** Taxa de crescimento da população e taxa de urbanização no Brasil (1940-2010).

**Tabela 2:** Deseconomias do transporte urbano.

**Tabela 3:** Poluentes do ar: impacto sobre a saúde.

**Tabela 4:** Tabela horária.

**Tabela 5:** Cidades com soluções intituladas equivocadamente como semáforos inteligentes.

**Tabela 6:** Implementações de semáforos inteligentes no Brasil.

**Tabela 7:** Documentos pesquisados.

**Tabela 8:** Dados e critérios utilizados na triangulação de informações.

**Tabela 9:** Entrevistados e perfil profissional.

**Tabela 10:** Identificação dos artigos selecionados.

**Tabela 11:** Propostas prioritárias.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| SIGLA         | DESCRIÇÃO DA SIGLA                                 |
|---------------|--|
| <i>BBC</i>    | <i>British Broadcasting Corporation</i>            |
| <i>BRB</i>    | <i>Belief Rule Base</i>                            |
| <i>CCTV</i>   | <i>Closed Circuit TeleVision</i>                   |
| CET           | Companhia de Engenharia de Tráfego                 |
| CONTRAN       | Conselho Nacional de Trânsito                      |
| CTA           | Central de Tráfego em Área                         |
| Denatran      | Departamento Nacional de Trânsito                  |
| EPE           | Empresa de Pesquisa Energética                     |
| <i>FL</i>     | Lógica Fuzzy (em português)                        |
| FIA           | Fundação Instituto de Administração                |
| <i>GPS</i>    | <i>Global Positioning System</i>                   |
| IBGE          | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística    |
| <i>IoT</i>    | Internet das coisas (em português)                 |
| IPEA          | Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada           |
| <i>ITACA</i>  | <i>Intelligent Traffic Adaptative Control Area</i> |
| <i>NDN</i>    | Rede de dados nomeados (em português)              |
| OMS           | Organização Mundial da Saúde                       |
| PIB           | Produto Interno Bruto                              |
| PlanMob/SP    | Plano de Mobilidade Urbana de São Paulo            |
| RSL           | Revisão Sistemática de Literatura                  |
| <i>RTO</i>    | <i>Real Time Optimization</i>                      |
| <i>SCATS</i>  | <i>Sydney Coordinated Adaptive Traffic System</i>  |
| <i>SCIELO</i> | <i>Scientific Electronic Library Online</i>        |
| <i>SCOOT</i>  | <i>Split Cycle Offset Optimization Technique</i>   |
| SEMCO         | Semáforos Coordenados por Computador               |
| <i>SUMO</i>   | <i>Simulation of Urban Mobility</i>                |
| TCU           | Tribunal de Contas da União                        |
| <i>TfL</i>    | <i>Transport for London</i>                        |
| <i>VANET</i>  | <i>Veicular Ad Hoc Networks</i>                    |
| <i>VIP</i>    | <i>Very Important Person</i>                       |
| <i>V2I</i>    | Veículo para infraestrutura (em português)         |
| <i>V2N</i>    | Veículo para a rede (em português)                 |
| <i>V2V</i>    | Veículo para veículo (em português)                |
| <i>V2X</i>    | Veículos com tudo (em português)                   |
| <i>VTL</i>    | Semáforos Virtuais (em português)                  |

## SUMÁRIO

|            |  |                  |
|------------|--|------------------|
| <b>1</b>   | <b><u>INTRODUÇÃO</u></b>   | <b><u>12</u></b> |
| <b>1.1</b> | <b>PROBLEMA DE PESQUISA</b>  | <b>14</b>        |
| 1.1.1      | QUESTÃO DE PESQUISA  | 15               |
| <b>1.2</b> | <b>OBJETIVOS</b>   | <b>16</b>        |
| 1.2.1      | OBJETIVO GERAL   | 16               |
| 1.2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS  | 16               |
| <b>1.3</b> | <b>JUSTIFICATIVA PARA ESTUDO DO TEMA</b>                             | <b>16</b>        |
| <b>1.4</b> | <b>ESTRUTURA</b>   | <b>18</b>        |
| <b>2</b>   | <b><u>REFERENCIAL TEÓRICO</u></b>                                    | <b><u>19</u></b> |
| <b>2.1</b> | <b>URBANIZAÇÃO E CRISE DE MOBILIDADE</b>                             | <b>19</b>        |
| <b>2.2</b> | <b>A QUESTÃO DA MOBILIDADE URBANA EM SÃO PAULO</b>                   | <b>26</b>        |
| <b>2.3</b> | <b>EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE CONTROLE SEMAFÓRICO</b>               | <b>30</b>        |
| <b>2.4</b> | <b>SEMÁFOROS INTELIGENTES: EXEMPLOS DE APLICAÇÕES</b>                | <b>42</b>        |
| <b>3</b>   | <b><u>METODOLOGIA DE PESQUISA</u></b>                                | <b><u>55</u></b> |
| <b>3.1</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO E DELINEAMENTO DE PESQUISA</b>                     | <b>55</b>        |
| <b>3.2</b> | <b>PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS</b>                               | <b>56</b>        |
| 3.2.1      | DADOS SECUNDÁRIOS  | 56               |
| 3.2.2      | ENTREVISTAS  | 62               |
| <b>3.3</b> | <b>PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS</b>                             | <b>64</b>        |
| 3.3.1      | PRÉ-ANÁLISE  | 65               |
| 3.3.2      | EXPLORAÇÃO DO MATERIAL   | 65               |
| 3.3.3      | TRATAMENTO DOS DADOS E INTERPRETAÇÕES                                | 68               |
| <b>4</b>   | <b><u>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</u></b>                     | <b><u>71</u></b> |
| <b>4.1</b> | <b>REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA</b>                             | <b>71</b>        |
| 4.1.1      | ANÁLISE DESCRITIVA   | 72               |
| 4.1.2      | ARTIGOS SELECIONADOS   | 73               |
| <b>4.2</b> | <b>IMPLANTAÇÃO DOS SEMÁFOROS INTELIGENTES NA CIDADE DE SÃO PAULO</b> | <b>75</b>        |
| 4.2.1      | ESCOLHA DA SOLUÇÃO   | 76               |
| 4.2.2      | INVESTIMENTO   | 77               |
| 4.2.3      | DESUSO   | 77               |
| <b>4.3</b> | <b>ANÁLISE DE CONTEÚDO</b>   | <b>78</b>        |
| 4.3.1      | RELEVÂNCIA DOS TEMAS PARA OS ENTREVISTADOS                           | 78               |
| 4.3.2      | MOTIVAÇÃO  | 78               |
| 4.3.3      | BENEFÍCIOS   | 86               |
| 4.3.4      | BARREIRAS E DIFICULDADES   | 94               |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.3.5    | TECNOLOGIAS .....   | 101        |
| 4.4      | APRENDIZADOS E PROPOSTA DE SOLUÇÃO .....                      | 117        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                             | <b>125</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                      | <b>128</b> |
|          | <b>APÊNDICE I- ARTIGOS DA RSL (104).....</b>                  | <b>144</b> |
|          | <b>APÊNDICE II- ESTRUTURA DO ROTEIRO DE ENTREVISTAS .....</b> | <b>148</b> |
|          | <b>APÊNDICE III- ROTEIRO DE ENTREVISTA ORIGINAL .....</b>     | <b>149</b> |
|          | <b>APÊNDICE IV- ROTEIRO DE ENTREVISTA REVISADO .....</b>      | <b>152</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Globalmente, mais pessoas vivem em áreas urbanas do que em áreas rurais. Em 2018, 4,2 bilhões de pessoas, 55,3% da população mundial, residia em áreas urbanas. Se comparado com 1950, quando 746 milhões, aproximadamente 30% da população mundial era urbana, nota-se um crescimento bastante expressivo, existindo projeções de que em 2050, 68,4% da população mundial será urbana (United Nations, 2018). Contudo, apesar destes dados, o crescimento urbano não se processou de maneira igualitária nas diversas partes do planeta. Neste sentido, de acordo com Santos (2008), o processo de urbanização dos países do Sul caracterizou-se pelo desenvolvimento acelerado e pela falta de planejamento, resultando no crescimento descontrolado das cidades.

Neste contexto, o Brasil pode ser citado como exemplo desse processo de urbanização acelerado, não planejado e potencialmente tardio e desigual (Quaresma, Ferreira, Ruiz & Oliveira, 2017). No início, o processo de urbanização foi lento neste país, como retratado por Villela e Suzigan (1973) no período de 1890 a 1920, com índices que passam de 6,8% a 10,7%, respectivamente; mas, de acordo com Quaresma et al. (2017), no período entre 1940 e 1980, estes índices sofreram uma inversão e evoluíram de maneira acelerada, variando de 26,35% para 68,86%, de acordo com Santos (2008), e de 31,23% para 67,59%, conforme Scarlato (2005). Os números apresentados pelos diferentes autores, embora divergentes, demonstram uma rápida aceleração no processo de urbanização, transformando o Brasil num país predominantemente urbano em um período de apenas 40 anos. Nos países desenvolvidos essa evolução foi alcançada em um período superior a um século (Vandermotten, 1985), devidamente acompanhado por um planejamento urbano adequado a esta nova realidade. O auge da aceleração do processo de urbanização brasileira ocorre na segunda metade do século XX, impulsionada pelo Programa de Metas do governo de Juscelino Kubitschek, com importante estímulo aos setores de energia e de transportes. Nesse período, ocorreram grandes investimentos estrangeiros, especialmente realizados pelos Estados Unidos, em vários setores industriais, dentre eles o automobilístico (Quaresma et al., 2017).

Com isso, dois fatores corroboraram para sobrecarregar o sistema de transporte: 1. a característica predominantemente urbana de domicílio da população brasileira, com aproximadamente 84%, segundo Censo Demográfico de 2010 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2011); e 2. os investimentos gerados e o impulso ao modal rodoviário, propiciando um aumento significativo da frota e motorização, alcançando, em 2012, nas metrópoles, patamares de 3,3 habitantes para cada veículo de passeio, o que corresponde a um veículo para cada domicílio (Observatório das Metrópoles, 2012). Neste contexto, um dos desafios dos grandes centros urbanos está no tema de transportes e mobilidade, abordado por vários estudos, como exemplos Carvalho (2016); Fundação Instituto de Administração (FIA) (2018); Alkhatib e Sawalha (2020); Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019); Scaringella (2001), entre outros.

Quando se trata da realidade de São Paulo, segundo Rolnik e Klintowitz (2011), a metrópole paulistana tem vivido uma crise de mobilidade urbana na década de 2001 a 2011. Outros dados apontados pelas referidas autoras respaldam essa caracterização de crise, como os engarrafamentos, analisados na primeira década do século XXI, que tiveram médias diárias de 118 km nas horas de maior tráfego, contribuindo para uma velocidade média no trânsito de 19,30 km/h, assim como, para elevar o tempo médio diário gasto pelos paulistanos no trânsito que correspondeu a 2 horas e 42 minutos. Segundo Pesquisa de Mobilidade Urbana na Cidade, realizada pelo Ibope Inteligência 2018 (Araújo, 2018), o paulistano gastou, em média, 2 horas e 43 minutos por dia para fazer todos os deslocamentos que precisa na cidade de São Paulo neste mesmo ano. As variações são pouco expressivas entre os anos analisados, mas igualmente desencadeiam sérias consequências que envolvem aspectos de saúde pública. Além disso, a saturação da infraestrutura de transportes causa impactos à sustentabilidade urbana, na medida em que gera lentidão, congestionamentos e aumento no tempo das viagens, causando transtornos econômicos, sociais e ambientais (Dessbesell, Frozza & Molz, 2015).

Diante destes problemas mencionados, soluções tecnológicas inovadoras surgem como importantes iniciativas ao combate deste quadro de crise de mobilidade, dentre as quais, as soluções relacionadas ao controle semafórico em tempo real, mais comumente chamada de semáforos inteligentes (Magableh, Almakhadmeh, Alsrehin & Klaib, 2020). O funcionamento do sistema dos semáforos inteligentes ou de controle em tempo real

compreende em detectar o fluxo de veículos próximos aos semáforos por meio de sensores estrategicamente posicionados, enviando essas informações automaticamente para um computador central, e recebendo, em um controlador de campo, as indicações temporais necessárias para acompanhar as variações do tráfego (Cucci, 2016). Nesse sentido, os semáforos inteligentes se colocam como uma alternativa de resposta, em tempo real, para atender com flexibilidade e eficiência as variações de comportamento do tráfego, causadas por acidentes, obras de emergência, eventos, ou até mesmo alterações no perfil do trânsito percebidas em diferentes horários e dias da semana (Cucci, 2016).

Estudos comprovam a eficiência dos semáforos inteligentes na melhoria do fluxo do trânsito, com relação a outros tipos de semáforos que não consideram as respostas em tempo real. Mugnola (2012) afirma que pode haver redução de atrasos e paradas em até 30% com a implantação dessa tecnologia. A *Transport for London (TfL)* (2018), conseguiu reduções de atrasos em 13% em Londres, gerenciando filas de carros ou dando prioridades para ônibus, quando necessário, como alternativa de combate ao congestionamento. Para isso, se utilizaram de um sistema que controla uma extensa rede de semáforos e que vem sendo atualizado ao longo do tempo. Londres pode ser citada como exemplo de uma cidade que tem se apropriado da tecnologia de semáforos inteligentes, implantando diferentes soluções e obtendo resultados satisfatórios no que tange às estratégias de controle semaforico. Segundo *TfL* (2018), a capital Inglesa tem na tecnologia um importante aliado e se destaca entre as cidades mais urbanizadas e desenvolvidas, em parte pela tecnologia semaforica de qualidade.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A população urbana tem enfrentado diariamente problemas em seus deslocamentos, despendendo muito do seu tempo nos congestionamentos, cerceando sua capacidade produtiva (Cintra, 2008), sua oportunidade de desenvolvimento intelectual e social (Rodrigues, 2016), além dos impactos relacionados à saúde física e mental gerados pela violência urbana, pela tensão e estresse em função dos congestionamentos, da poluição do ar e do constante ruído (Saldiva, 2016). Devido a tais problemas, a melhoria da mobilidade urbana tem se apresentado como um importante desafio para os grandes centros urbanos. Com isso, o uso de tecnologia tem se mostrado um aliado essencial no

sentido de melhorar essas condições, disponibilizando soluções inovadoras e obtendo resultados positivos para as pessoas e, conseqüentemente, para as cidades (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005).

Nesse contexto, soluções como as relacionadas ao controle semafórico em tempo real, têm se mostrado eficientes para reduzir dificuldades habituais do tráfego urbano, melhorando a experiência de quem se desloca por uma cidade (Palsa, Vokorokos, Chovancova & Chovanec, 2019). No caso de São Paulo, o uso de tecnologias de controle semafórico inteligente foi iniciado na década de 1990. Neste período, foram pesquisadas várias soluções e tecnologias e a capital paulista optou por implementar duas soluções, pelos benefícios alcançados por ambas e por atenderem aos requisitos necessários: a mesma implementada em Londres, por tê-la como referência pelo grande sucesso, assim como uma solução espanhola, numa parcela menor da cidade (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005). No entanto, diferentemente de Londres, que, segundo *TfL* (2018), permanece evoluindo nesse campo, trazendo para a realidade dessa cidade tecnologias mais avançadas e, conseqüentemente, mais eficientes, o que se constata é que São Paulo optou por abrir mão do uso do investimento feito nos semáforos inteligentes.

Diante das comprovadas melhorias proporcionadas pelo uso de sistemas semafóricos de controle real, à exemplo do aumento da fluidez e economia de tempo de espera nos semáforos, reduções de colisões com vítimas e atropelamentos (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005), bem como diante da gradual e frequente evolução destes sistemas em outras metrópoles do mundo (Magableh, Almakhadmeh, Alsrehin, & Klaib, 2020), cabe entender o porquê da cidade de São Paulo, que experimentou resultados positivos no passado, não ter acompanhado essa evolução, pelo contrário, interrompeu seu uso, retroagindo a modelos menos adaptativos e, portanto, menos eficientes.

### 1.1.1 Questão de Pesquisa

Por que São Paulo deixou de fazer uso de tecnologias de controle semafórico inteligente e como este uso poderia ser retomado com vias a reduzir os problemas de mobilidade urbana existentes nesta cidade?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O propósito deste estudo é analisar o contexto de adoção e desuso de tecnologia de controle semafórico inteligente na cidade de São Paulo, bem como a viabilidade da retomada do uso deste tipo de tecnologia.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a denominada crise de mobilidade urbana na cidade de São Paulo;
- Analisar os avanços das tecnologias de controle semafórico no contexto internacional;
- Analisar as tecnologias de controle semafórico utilizadas em São Paulo;
- Mapear o estado da arte mundial em controle semafórico inteligente;
- Analisar o contexto da inserção dos semáforos inteligentes na cidade de São Paulo e sua posterior desativação;
- Propor alternativas de tecnologias semafóricas que possam melhorar os problemas relacionados à mobilidade urbana em São Paulo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA PARA ESTUDO DO TEMA

À medida que o mundo continua a se urbanizar e se tornar cada vez mais global e interconectado, United Nations (2018) destaca que em 2050, mais de 65% da população global viverá em cidades, além de projeções de crescimento da população urbana de 2,5 bilhões de habitantes urbanos entre 2014 e 2050. Com isso, segundo Ritchie e Roser (2018) os desafios do desenvolvimento sustentável estão cada vez mais concentrados nas cidades e elas poderão ser as protagonistas de um processo de transformação para o desenvolvimento sustentável (Conti et al., 2019). Adicionalmente, a densidade de pessoas e empresas nas cidades demanda uma infraestrutura mais elaborada e, tecnologicamente

mais apropriada, para atender essas necessidades e garantir benefícios na vida das pessoas (Netto & Ramos, 2016).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o número de veículos motorizados aumentou 16% de 2010 a 2013, alcançando o expressivo volume de 64 milhões de veículos de passageiros novos nas vias em todo o mundo em 2014 (OMS, 2015), sendo a cidade de São Paulo responsável pela presença de mais de 4,8 milhões de automóveis nas ruas em 2012 (Denatran, 2020). Com isso, soluções para tornar o sistema de tráfego mais eficiente tem se tornado cada vez mais frequentes, não se restringindo a alternativas relacionadas à infraestrutura, mas abrangendo também ações relacionadas ao transporte público, acessibilidade, questões sociais, tecnologias, entre outras (Netto & Ramos, 2016). Neste contexto e, respaldado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2012), o uso de semáforos inteligentes se coloca como uma alternativa tecnológica que corrobora com a melhoria da Mobilidade Urbana e consequentemente com os três pilares da Sustentabilidade: no âmbito econômico, menor consumo de combustíveis e maior capacidade produtiva; no social, menor tempo dispendido no trânsito e melhoria na qualidade de vida e no ambiental, diminuição na emissão de poluentes.

Pesquisas realizadas por Dessbesell et al. (2015), constataram a eficácia no emprego de modelos inteligentes para o controle do tráfego urbano, em ambiente de simulação e, após isso, desenvolveram um semáforo inteligente, obtendo resultados de grande relevância. Celik e Karadeniz (2018) avaliaram três diferentes sistemas de semáforos e, em todas as soluções testadas, os sistemas inteligentes apresentaram desempenho superior aos tradicionais.

No Plano de Mobilidade Urbana de São Paulo (PlanMob/SP) (2015) foi considerada a utilização de recursos tecnológicos para o monitoramento e gerenciamento do viário. Adicionalmente, o plano reconhece a importância da implantação dos semáforos inteligentes no atendimento da demanda do viário, apontando uma estimativa de redução de 16%, em média, nos atrasos de viagem, identificada em estudos e pesquisas. No plano foi explicitada inclusive a quantidade planejada de vias e cruzamentos (3000) que se beneficiariam com o uso da tecnologia em tempo real, assim como em tempo fixo. Como citado no próprio PlanMob/SP (2015), o plano é uma

atividade permanente em que novas tecnologias, dados e processos se incorporam na medida em que surgem ou são ofertados. Contudo, desde a sua publicação, a implementação efetiva de novas tecnologias em controle semafórico não ocorreu, apesar de poucas ações sem continuidade e sem resultado prático final.

Por fim, analisando-se a literatura existente, verifica-se ainda um número insuficiente de estudos que visem o entendimento e a aplicação de tecnologias que poderiam contribuir para a melhoria da Mobilidade Urbana. Levando-se em conta esta informação, bem como a problemática apresentada nos parágrafos anteriores, é possível afirmar que esta temática merece melhor estudo e meditação, constituindo-se, portanto, em uma questão, tal como expresso por Ferreira (2010). Assim, a presente dissertação analisa a questão do uso do controle semafórico inteligente na cidade de São Paulo. Para alcançar tal objetivo, o presente estudo iniciou com a análise dos avanços tecnológicos de controle semafórico no mundo, passando pela análise das tecnologias de controle semafórico utilizadas na cidade de São Paulo, bem como pela análise do contexto da inserção dos semáforos inteligentes nesta cidade e da sua posterior desativação, chegando, por fim, à proposição de alternativas de tecnologias semafóricas que possam melhorar o quadro de crise de mobilidade urbana na cidade de São Paulo.

#### 1.4 ESTRUTURA

Esta pesquisa está estruturada em cinco seções, sendo a primeira constituída pela presente introdução, contendo a questão de pesquisa, os objetivos e a justificativa. A segunda seção, na qual se apresenta o referencial teórico deste estudo, encontram-se cinco capítulos, a saber: 1. Urbanização e crise de mobilidade; 2. A questão da mobilidade urbana em São Paulo; 3. Evolução das tecnologias de controle semafórico; 4. Semáforos inteligentes: exemplos de aplicação. Na seção seguinte, apresenta-se o método de pesquisa, contemplando a caracterização e o delineamento da pesquisa, os procedimentos metodológicos, a consolidação metodológica, o procedimento de coleta de dados e o procedimento de análise de dados. Na quarta seção, apresentam-se a Análise e a Discussão dos Resultados, sendo composta por quatro tópicos. Por fim, a quinta seção destina-se às considerações finais, seguida pela apresentação das referências utilizadas na pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo, fundamentar a base teórica que suportará as discussões, análise de dados e resultados a serem desenvolvidos durante a pesquisa. Nele se traz à discussão os principais motivadores da crise de mobilidade urbana no Brasil, assim como as implicações geradas nas cidades, seguido da trajetória de fatores que contribuem para o problema de mobilidade urbana em São Paulo, bem como possibilidades de respostas à crise de mobilidade na cidade. Posteriormente, apresenta-se a evolução dos sistemas de controle semafóricos e como eles podem se posicionar como medidas de mitigação aos problemas de mobilidade urbana. Por fim são discorridos exemplos de aplicação dos semáforos inteligentes no Brasil e no mundo.

### 2.1 URBANIZAÇÃO E CRISE DE MOBILIDADE

O maior motivador da urbanização foi a industrialização, com os avanços e transformações oriundos da Revolução Industrial. Iniciada no fim do século XVIII, tal revolução potencializou o crescimento exponencial das principais cidades na Europa, especificamente as mais industrializadas. O processo de urbanização ocorreu essencialmente pelo deslocamento de pessoas oriundas das zonas rurais em direção às zonas urbanas, maiores e mais densas, e pela atividade produtiva, que deixa de ser agrícola para se tornar industrial, comercial, além da realização de prestação de serviços (Vieira, Fontana, Barroso, Rodrigues & Silva, 2015).

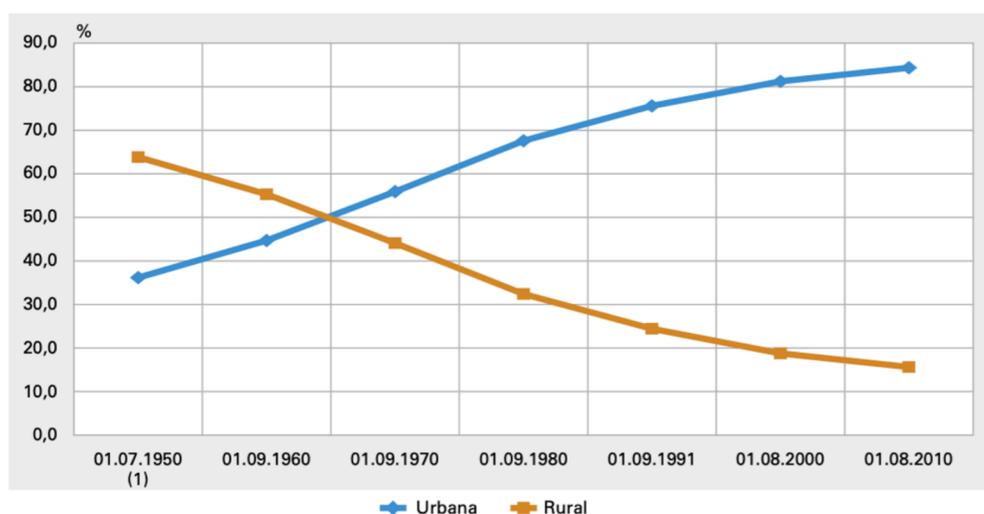
A transição urbana não se sucedeu de maneira simultânea no mundo, os índices de urbanização oscilam de acordo com os continentes, países e estados. Segundo o relatório World Urbanization Prospects (United Nations, 2018), em 2018 mais da metade da população mundial, 55,3%, vive em áreas urbanas e, estima-se que nas próximas décadas, haverá mudanças mais significativas no tamanho e na distribuição espacial da população global. Dados oriundos desse mesmo relatório de 2018 projetam crescimento da população urbana global, entre 2014 e 2050, de 2,5 bilhões de habitantes, alcançando

o percentual de 68,4% de urbanização, concentrando 90% desse aumento na Ásia e África.

Os índices de pessoas que vivem em cidades são bastante distintos: a África possui 42,5% de seus habitantes vivendo em cidades, na Ásia são 49,9%, na América Latina e Caribe 80,7%, na América do Norte 82,2% e na Europa 74,5%. Observando sob outra ótica, relacionada à da riqueza dos países, a disparidade entre os percentuais de população urbana e rural é ainda mais impressionante; por exemplo, enquanto 98% das pessoas vivem em centros urbanos na Bélgica, em Burundi esse índice é de 13% (United Nations, 2018).

A realidade no Brasil é de uma população majoritariamente urbana (84,4%), segundo IBGE (2011); no entanto, nem sempre o Brasil teve esses percentuais. Inicialmente, seus processos de industrialização e urbanização foram lentos e motivados pela falta de interesse industrial, proveniente dos aristocratas agroexportadores, pela permanência de mão de obra escrava, que reduziu o desenvolvimento de um mercado interno e em função do privilégio dos mercados externos em detrimento dos internos, gerados pela exportação de produtos agrícolas (Quaresma et al., 2017).

Como representado na Figura 1, a inversão quanto ao local de residência no Brasil, de predominantemente rural para residência urbana, se deu entre os anos 1960 e 1970.



**Figura 1.** Proporção da população residente, por situação do domicílio – 1950/ 2010.  
Fonte: IBGE (2011).

Pela análise da Figura 1, nota-se que, a partir dos anos 1950, as diferenças entre a quantidade de população urbana e rural vieram diminuindo, até que, em meados da década de 1960, a população urbana superou a população rural e, desde então, essas diferenças se potencializaram. Adicionalmente, a Tabela 1 representa que o crescimento da população não se dá no mesmo ritmo que a população urbana, caracterizando o desenvolvimento brasileiro como sem planejamento, resultando no crescimento descontrolado das cidades.

**Tabela 1**

Taxa de crescimento da população e taxa de urbanização no Brasil (1940-2010).

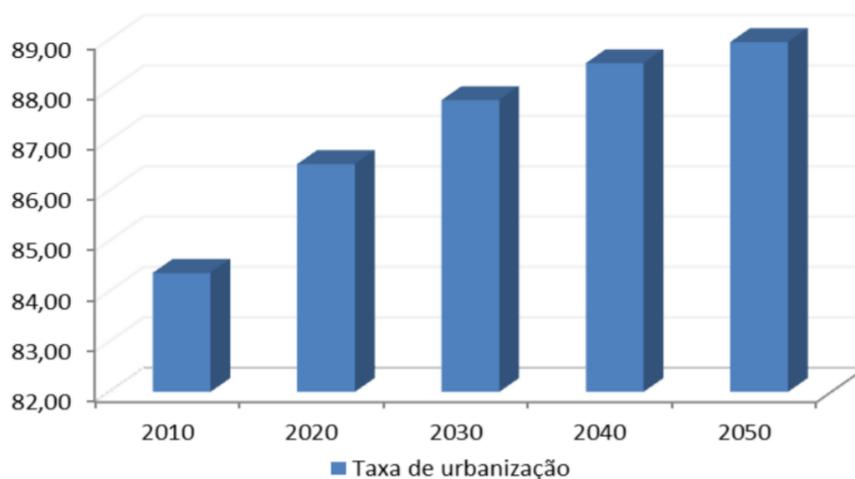
| Décadas | Crescimento populacional total (%) | Crescimento populacional urbano (%) | Taxa de urbanização % |
|---------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 40-50   | 25,9                               | 72,8                                | 26,4                  |
| 50-60   | 36,7                               | 72                                  | 36,2                  |
| 60-70   | 33,1                               | 66,1                                | 45,5                  |
| 70-80   | 28,2                               | 55,4                                | 56,8                  |
| 80-90   | 21,3                               | 35,8                                | 68,9                  |
| 90-00   | 15,6                               | 21,8                                | 77,1                  |
| 00-10   | 12,3                               | 16,4                                | 81,3                  |
| 10-20   |                                    |                                     | 84,2                  |

Fonte: Elaborado pela autora com dados provenientes do IBGE (2011).

Com base na Tabela 1, observa-se que as taxas de crescimento populacional total vêm reduzindo desde as décadas de 1950-1960 e, apesar das taxas de crescimento populacional urbano também decrescerem a partir destas décadas, isto ocorreu de maneira menos acentuada. Os constantes movimentos migratórios de áreas rurais com destino às áreas urbanas, assim como os menores crescimentos populacionais da área rural, contribuíram para este comportamento (IBGE, 2011).

De acordo com Santos (2008), observa-se que, no período entre 1940 e 1980, a população do Brasil triplica, enquanto que a população urbana se multiplica por sete vezes e meia, saindo de 26,35% em 1940, para 68,86% em 1980, caracterizando o desenvolvimento brasileiro como sem planejamento, resultando no crescimento

descontrolado das cidades. Para 2050 estima-se que aproximadamente 89% da população brasileira seja urbana, como apresentado na Figura 2. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2015), o crescimento em números absolutos é ainda mais expressivo, pois a população urbana em 2050 será equivalente ao número total de habitantes no país no ano de 2010.



**Figura 2.** Taxa de urbanização- Cenário econômico 2050.  
Fonte: EPE (2015).

Mitcheell (2008) afirma que uma metrópole depende de duas coisas básicas para funcionar: um bom planejamento de uso do solo somado a um sistema de transporte eficiente. No entanto, o auge da aceleração do processo de urbanização brasileira não foi acompanhado no mesmo ritmo pelo planejamento. Houve importantes estímulos aos setores de energia e de transportes, destacando-se os estímulos feitos no setor automobilístico, por meio da implantação de estradas de rodagem e pela instalação de montadoras de veículos provenientes de investimentos realizados pelos Estados Unidos (Quaresma, et al., 2017).

Frente a este cenário, o padrão de mobilidade da população brasileira vem passando por fortes alterações, afetado pelo acelerado e desordenado processo de urbanização e, adicionalmente pela priorização da opção rodoviária na matriz de transportes e pelo uso, cada vez mais acentuado, do transporte motorizado individual pela população (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada [IPEA], 2010). Essa realidade

trouxe para o centro das prioridades o tema da mobilidade urbana que anteriormente considerava somente a circulação de veículos, ampliando sua definição e tendo como foco as pessoas e temas relacionados à organização territorial e à sustentabilidade nas cidades (Tribunal de Contas da União [TCU], 2010).

No contexto do PlanMob/SP (2015), a mobilidade urbana considera vários predicados que favorecem a qualidade e eficiência da mobilidade, entre eles: transporte público coletivo, acessibilidade universal nos passeios e edificações, prioridade ao transporte coletivo no sistema viário, terminais de transporte intermodais, acessibilidade universal na frota de coletivos, rede cicloviária, existência de bicicletários e paraciclos, comunicação eficaz com os usuários.

Para satisfazer as necessidades geradas pela Mobilidade Urbana são necessários investimentos de infraestrutura, boa gestão de trânsito e segurança, além da diversificação dos modais de transporte; e que todos funcionem de maneira eficiente (Scaringella, 2001). No entanto, muitos ainda partem da definição de mobilidade urbana como uma condição de deslocamento de um ponto a outro dentro da cidade, deixando de analisar variáveis fundamentais que devem ser vistas e pensadas conjuntamente para obter um resultado eficiente no que tange à mobilidade (FIA, 2018).

Torna-se importante destacar que os problemas relacionados à mobilidade urbana impactam as esferas social, ambiental e econômica das cidades, colocando-se como um desafio ao desenvolvimento sustentável das mesmas.

Com relação à esfera econômica, segundo Benedet (2015), a deterioração do transporte urbano, causada pelos congestionamentos e pela redução da qualidade dos serviços e da infraestrutura, tem levado ao aumento das deseconomias do setor. Segundo IPEA (1998), deseconomias, define-se como o custo adicional do transporte devido aos congestionamentos, levando em consideração o aumento do consumo de combustível, emissão de poluentes, do tempo gasto e da ocupação do espaço urbano pelos veículos, que, por sua vez, geram impactos na economia das cidades e no desenvolvimento sustentável do país. A Tabela 2 mostra as deseconomias do transporte urbano, classificadas em custos internos e custos externos.

**Tabela 2**  
Deseconomias do transporte urbano.

| <b>Categoria de custos</b> | <b>Internos/Privados</b>   | <b>Externos</b>  |
|----------------------------|--|--|
| Despesas de transporte     | Aquisição, manutenção, operação do veículo<br>Tarifas de transporte público    | Estacionamento pago por terceiros  |
| Infraestrutura             | Imposto de circulação<br>Imposto sobre combustível                             | Custos de infraestrutura não cobertos  |
| Congestionamento           | Tempo do próprio usuário   | Tempo dos demais usuários  |
| Ambientais                 | Poluição sofrida pelo próprio usuário  | Poluição sofrida pelos demais usuários e pela sociedade  |
| Acidentes                  | Seguros pagos pelos usuários<br>Custos de acidentes pagos pelo próprio usuário | Custos de acidentes pagos pelos demais envolvidos<br>Dor e sofrimento impostos aos demais envolvidos |

Fonte: Benedet (2015).

Pela análise da Tabela 2, os custos internos e/ou privados são aqueles pagos pelos usuários, assumidos por eles, que podem ser contabilizados em seus processos de decisão por serem custos por eles produzidos (custos de aquisição, imposto, seguro, entre outros). Já as externalidades dos transportes, representadas no quadro como custos externos, são causados pelos contratempos tanto com o trânsito, quanto por poluição ao meio ambiente e aumento do número de acidentes de trânsito. As externalidades no transporte urbano referem-se à ocorrência de custos que não são pagos pelos usuários, nem considerados na sua decisão de deslocar-se. Ao não considerar os custos externos, os usuários utilizam mais os transportes e as vias do que seria desejável economicamente (Vasconcelos & Lima, 1998). Segundo Cintra (2008), outro custo do congestionamento a ser apontado é o custo da oportunidade, isto é, o custo do tempo perdido no trânsito que poderia ser aproveitado em outra atividade, podendo, por exemplo, ser utilizado para uma atividade produtiva.

A contaminação atmosférica emitida pela frota veicular representa um dos impactos ambientais relacionados à crise de mobilidade. Segundo Saldiva (2016), professor titular do laboratório de patologia clínica da Universidade de São Paulo, esse tipo de poluição pode causar envelhecimento dos órgãos e tecidos do corpo humano, em casos de exposições crônicas. Além de comprometer a saúde das pessoas, a poluição atmosférica gerada pelos automóveis, também interfere na biota presente em áreas urbanas. Segundo Iriti e Faoro (2008); Dizengremel, Thiec, Bagard e Jolivet (2008), as plantas podem apresentar problemas deletérios, podendo impactar até a escala da comunidade. Adicionalmente, de acordo com Banco Mundial (2003), a poluição do ar produzida pelos transportes em países em desenvolvimento contribui para a morte prematura de mais de meio milhão de pessoas por ano e impõe um custo econômico que chega a 2% do Produto Interno Bruto (PIB) desses países. A Tabela 3 demonstra os poluentes do ar e seus respectivos impactos à saúde.

**Tabela 3**

Poluentes do ar: impacto sobre a saúde.

| Poluente        | Impacto sobre a saúde   |
|-----------------|---|
| CO              | Reduz a oxigenação do organismo<br>Provoca dores no peito<br>Em elevadas concentrações, reduz a acuidade visual, a capacidade de aprendizado, podendo levar a óbito |
| NOx             | Altera a capacidade pulmonar<br>Contribui com a chuva ácida e a formação de partículas secundárias<br>É precursor do ozônio no nível do solo                        |
| Pb              | Aumenta incidência de abortos<br>Prejudica funções renais<br>Aumenta a pressão arterial<br>Retarda o desenvolvimento das crianças                                   |
| MPS             | Problemas no aparelho respiratório<br>Aumenta o risco de câncer   |
| SO <sub>2</sub> | Altera as funções pulmonares<br>Contribui com a chuva ácida e a formação de partículas secundárias<br>É precursor do ozônio no nível do solo                        |

Fonte: Benedet (2015).

Pelo exposto, o tempo e as condições em que ocorre o deslocamento das pessoas dentro de uma cidade ou da área metropolitana impactam muito na sua qualidade de vida. Isso só se potencializa com a tendência de aumento da urbanização e pela expectativa de que até 2030 mais de dois bilhões de pessoas vão ascender à classe média no mundo e com isso, espera-se que as vendas de automóveis aumentem significativamente, saindo de 70 milhões por ano em 2010 para 125 milhões em 2025 (Knupfer, Bouton, Mihov & Swartz, 2015).

## 2.2 A QUESTÃO DA MOBILIDADE URBANA EM SÃO PAULO

Entre os anos de 2000 e 2020, a frota de veículos automotivos quase triplicou no Brasil. Segundo Martine, Ojima e Fioravante (2012), a frota de veículos no Brasil dobrou entre 2000 e 2012, passando de 19,9 milhões para 40 milhões, enquanto que dados do Departamento Nacional de Trânsito (Denatran) (2020) apontam que a frota veicular brasileira em abril de 2020 era de 57 milhões de automóveis, gerando com isso um aumento de 2,87 vezes se comparado com o ano 2000. Adicionalmente, a relação de habitantes por carro sofreu alteração de nove habitantes por carro (9:1) em 2000 para cinco habitantes por carro (5:1) em 2012 (Martine et al., 2012) e, segundo dados do IBGE (2020a), com o incremento da população brasileira em 2020 para 211,5 milhões de habitantes, a relação alcançou três vírgula sete habitantes por carro (3,7:1).

Segundo o Denatran (2020), em 2012 a cidade de São Paulo contava com mais de 4,8 milhões de automóveis nas ruas, ou seja, 12% da frota brasileira. Entre 2001 e 2012, a frota paulistana cresceu 54%, obtendo com isso uma relação de dois vírgula quatro habitantes por carro (2,4:1) em 2012. Nesse contexto e segundo os dados apresentados, em 2020, São Paulo tem aproximadamente 10,4% da frota nacional, o que representa 5,9 milhões de carros (Denatran, 2020) e uma população estimada de 12,2 milhões de habitantes em 2019 (IBGE, 2020b), com uma relação de aproximadamente dois carros por habitante (2:1).

De acordo com Cintra (2013), o aumento da frota de veículos em São Paulo, gera mais demandas por vias de circulação, que não são atendidas a curto prazo. Além disso, não existem alternativas viáveis para infraestrutura, nem tão pouco transportes coletivos

suficientes para atender a essa necessidade, contribuindo assim para o agravamento da crise de mobilidade existente.

Outros fatores como a concentração urbana, os deslocamentos pendulares simultâneos e a precariedade do transporte coletivo e do sistema viário, contribuem para o problema de mobilidade urbana.

A extensão e a gravidade do problema do trânsito paulistano requerem uma abordagem sistêmica, uma intervenção profunda com visão de longo prazo. É um desafio tecnológico, político e administrativo que exige um tratamento mais holístico e menos setorizado e um amplo debate com todos os segmentos representativos (Scaringella, 2001, p.56).

Ainda segundo o autor, os congestionamentos se expandem a áreas da periferia, agravando a crise de mobilidade e ampliando as áreas congestionadas, originando o que ele intitula como mobilidade clandestina, sem planejamento e sem controle.

Rolnik e Klintowitz (2011) também apontam uma importante crise de mobilidade vivida pela metrópole paulistana, com índice recorde de congestionamento em São Paulo em 2009, com 294 km de lentidão, tendo como médias diárias na década de 2000, 118 km de vias congestionadas nos horários de pico. Trazendo para a realidade atual, os dados se alteraram, porém não descaracterizaram o problema, haja visto que São Paulo registrou novo recorde histórico, com 344 km de vias congestionadas simultaneamente em toda a cidade (ElPais, 2017).

Outros dados, retratam os congestionamentos na cidade de São Paulo, entre eles estão a velocidade média do trânsito, medidos nos horários de pico da manhã e da tarde, de 19,30 km/h entre 2000 e 2008, assim como o tempo médio em que os paulistanos ficam no trânsito para realizar todos os deslocamentos diários, registrado em 2 horas e 42 minutos (Rolnik & Klintowitz, 2011). Analisando dados mais recentes (Araújo, 2018), o tempo gasto pelo paulistano em 2018, praticamente não sofreu alterações, se comparado como em 2008, no entanto no que tange à velocidade média, em 2017 foi registrada 22,75 km/h (Knupfer et al., 2015).

De acordo com Netto e Ramos (2016), o Índice de Mobilidade (viagens por habitantes por dia) no período entre 2003 a 2012, aumentou 10%, sendo que o maior aumento foi observado no transporte individual motorizado, correspondendo a 18%. Pero

e Stefanelli (2015) destacam um significativo aumento do tempo médio de deslocamento de casa ao trabalho nas regiões metropolitanas brasileiras entre os anos de 1992 e 2013. Os referidos autores apontam o destaque da cidade de São Paulo, a qual apresentou um tempo médio de deslocamento casa-trabalho de 45,6 minutos em 2012, tendo no mesmo ano, 23,5% da população utilizado mais de uma hora para realizar esse deslocamento.

Para Rolnik (2013), a (i) mobilidade, como ela intitula o problema de mobilidade em São Paulo, se trata de uma realidade associada a um sistema de transporte e circulação incompatível com os fluxos da cidade; oriundos de uma política urbana criada para dar resposta à crise urbana que São Paulo teve na década de 1930. Em 1933, São Paulo tinha uma rede de bondes com 258 km de extensão, pouco mais de duas vezes e meia maior que a atual extensão do metrô, com 96 km segundo o Portal do Governo do Estado de São Paulo (2020). No entanto, nesta década, outras alternativas foram dadas ao governo, propiciando a construção de um sistema unificado de bonde-ônibus, assim como a elaboração do Plano de Avenidas, por Prestes Maia, onde a orientação era o descongestionamento e a expansão do centro, por meio de um sistema de avenidas e viadutos, além de uma perimetral sobre o leito das linhas férreas e a construção das marginais Tietê e Pinheiros. Seguindo este plano, várias obras viárias foram realizadas, propiciando maior circulação dos automóveis e estruturando o crescimento da cidade com um modelo de expansão horizontal, tendo o ônibus como alternativa de transporte mais adequada para atender a periferia.

Esses eventos passaram a ser um divisor de águas e, a partir deles, várias ações contribuíram para o desenvolvimento dos transportes coletivos na cidade de São Paulo e, particularmente, para permitir que os automóveis passassem a transitar de maneira mais fluida pelas avenidas. Além disso, a reestruturação viária propiciou a expansão imobiliária e o aumento da circulação das pessoas, seja por automóveis, utilizados pela classe média, seja por ônibus, para atender a loteamentos populares na periferia da cidade (Rolnik, 1997). Destacam-se ainda, novas avenidas para interligar regiões e o aumento expressivo da estrutura do sistema viário, com integrações abrangendo a região central da mancha urbana. Um importante marco surge na década de 1970, relacionado à alocação de recursos destinados à mobilidade urbana; nesse período, os gastos em

sistemas viários diminuem, dando lugar a maiores gastos em transportes coletivos em função substancialmente do Metrô (Anelli, 2007).

O que se segue, dentro do projeto de mobilidade, são investimentos alternados: ora eles acontecem na infraestrutura do sistema viário, priorizando o transporte individual, atendendo à alta demanda gerada pela classe média por meio da aquisição de veículos, ora os investimentos se voltam para o transporte coletivo, quando começam a surgir problemas de tráfego. Nesse sentido, os investimentos privilegiam o metrô e as interligações com ônibus (Rolnik & Klintowitz, 2011). Estes diferentes focos de investimentos também se originam das prioridades dadas pelos governantes à época, alguns priorizando grandes obras no sistema viário, outros dando mais atenção e investindo em transportes coletivos. Segundo Rolnik e Klintowitz (2011), o histórico de ações e intervenções apresentado levou à crise de mobilidade urbana, com seus respectivos números e índices alarmantes mostrados anteriormente.

Para mitigar o impacto na sociedade da Crise de Mobilidade, segundo Scaringella (2001), o plano ou o modelo a ser proposto deve contar com vários atores, entre eles, políticos, tecnológicos e administrativos; segundo ele, racionalizar o uso da infraestrutura já existente é prioritário e ferramentas como as de engenharia de tráfego, tecnologia comportamental e o compartilhamento e utilização da informação, são essenciais para esse fim.

Netto e Ramos (2016), em estudo realizado sobre Mobilidade Urbana, concluíram a partir dos dados dos autores pesquisados, que somente um processo social será capaz de transformar a realidade da mobilidade urbana; enfatizando equidade social, nível de escolaridade e cidadania. No entanto, alguns avanços técnicos ainda são necessários, plataformas de informação com dados em tempo real, problemas técnicos de engenharia de tráfego e infraestrutura continuam sendo relevantes.

Estudo realizado pela McKinsey (Knupfer et al., 2015) conclui que a solução deve ter um importante componente tecnológico, por meio de softwares de otimização do tráfego, veículos elétricos, compartilhamento de carros, melhorias no transporte público e incentivo aos pedestres e ciclistas.

Vários estudos convergem à mesma resposta à crise de mobilidade, por entenderem não se tratar de algo simples e passível de solução com uma única linha de ação; as soluções são multidisciplinares, envolvem a participação e a orquestração de medidas que, em conjunto, devem ir ao encontro de uma condição melhor para a população. Nesse sentido, investimentos em expansão da malha ferroviária e metroviária, ampliação das linhas exclusivas de ônibus, implantação de corredores de ônibus, desestímulo ao transporte individual nas regiões centrais por meio de pedágio social, descentralização de atividades econômicas, promoção de acessibilidade, inclusão social, além das soluções tecnológicas deverão estar coordenadas para o propósito único da melhoria da mobilidade urbana (Rolnik & Klintowitz, 2011; Scaringella, 2001; Knupfer et al., 2015).

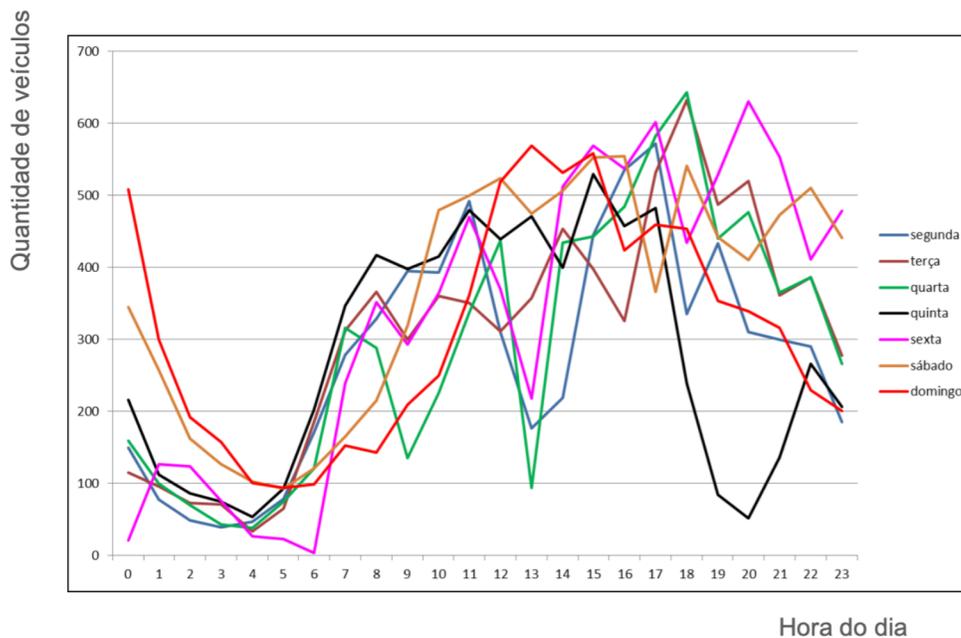
### 2.3 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE CONTROLE SEMAFÓRICO

Como visto, muitas ações podem ser realizadas para minimizar os impactos gerados pela crise de mobilidade urbana. Nesse sentido, pode-se destacar o controle semafórico como um importante mecanismo para otimizar o tráfego de veículos e pedestres nas cidades. Considerado em maus cenários uma fonte de congestionamentos e desrespeitos a sinalização, se utilizado de maneira adequada, minimiza a perda de tempo nos deslocamentos motorizados e gera maior segurança aos pedestres, proporcionando melhor qualidade de vida para a população (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005).

No entanto, as alternativas de controles semafóricos disponíveis passaram por uma importante evolução ao longo do tempo, para alcançar os patamares de sofisticação e tecnologia encontrados hoje. Os semáforos foram desenvolvidos a partir de equipamentos manuais de operação de tráfego utilizados em Londres no ano de 1868. Em 1913, James Hoge inventou o primeiro semáforo automático como hoje é conhecido. Esta invenção aparece como sendo a origem do semáforo a três cores, que se propagou nos Estados Unidos no começo da década de 1920. Trata-se de um dispositivo de controle de tráfego com indicações luminosas para motoristas e pedestres, que define o direito de passagem de veículos e/ou pedestres (Duarte, 2016; Yuki, 2008).

Utilizado em cidades por todo o mundo, adota uma linguagem de fácil compreensão por ter um visual bem simples. A dificuldade está no gerenciamento dos tempos desses semáforos, que devem acompanhar a alteração dos fluxos de tráfego, evitando com isso gerar demoras desnecessárias (Cucci, 2016).

Os semáforos tradicionais possibilitam o controle do tráfego de maneira pouco eficiente em relação às necessidades que cada via pode ter em diferentes horários, durante o dia, e nos distintos dias da semana. Contudo, essas mudanças de comportamento são inevitáveis e passaram a demandar alterações nos tempos dos semáforos, exigindo com isso uma reprogramação constante (Bonetti & Pietrantonio, 2006). A Figura 3 representa um trecho de via que antecede um semáforo específico de São Paulo e a quantidade de veículos que circulam por ele, durante os diferentes dias da semana e os distintos horários do dia.



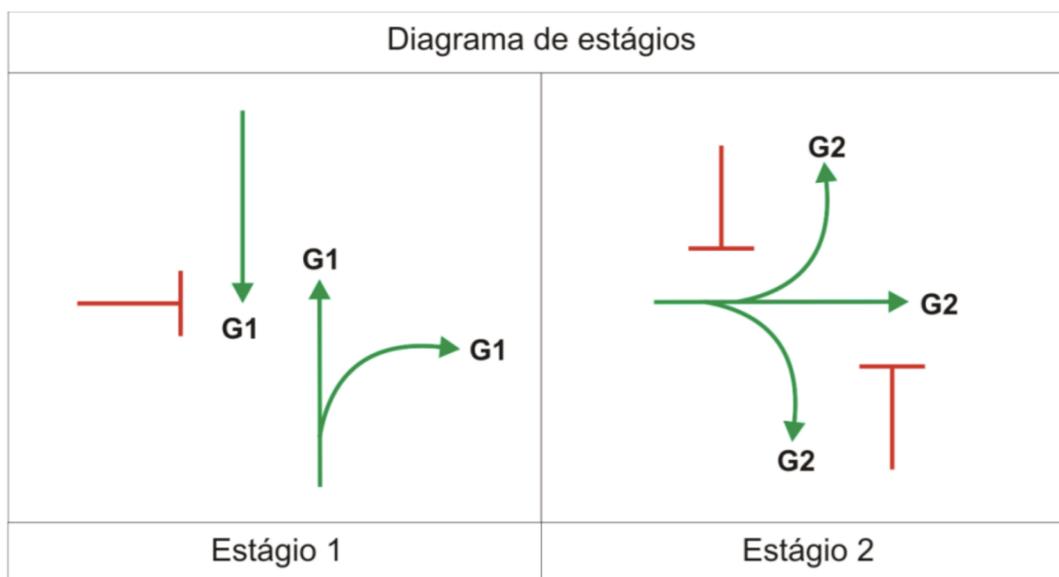
**Figura 3.** Variação do volume de trânsito (dias de semana).

Fonte: Cucci (2016).

Com base na Figura 3, pode-se notar que há uma variação irregular da demanda de tráfego; a quantidade de carros que circulam em um domingo, por exemplo, é bastante diferente de um outro dia na semana, assim como se comparados os horários da

madrugada, com horários considerados de pico, entre 7h e 10h da manhã e entre 17h e 20h (Cucci, 2016).

Nesse sentido, se utilizado o mesmo tempo de verde para todos os dias e para todos os horários, seu desempenho seria ineficiente, gerando congestionamentos ou esperas desnecessárias. Para atender a estas variações, surgiram os semáforos pré-programados ou semáforos em tempos fixos, cujo ciclo semafórico é constante e o tempo de duração dos períodos de verde, amarelo e vermelho são os mesmos a cada ciclo (Cucci, 2016). A Figura 4 permite ilustrar e definir alguns conceitos básicos necessários para um melhor entendimento dos semáforos em tempos fixos.

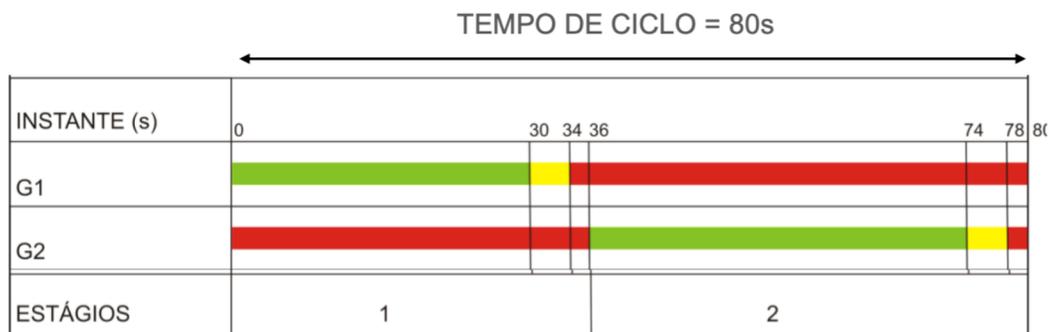


**Figura 4.** Diagrama de estágios.

Fonte: Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) (2014).

Estágio é o intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos não conflitantes recebem simultaneamente o direito de passagem (CONTRAN, 2014). Na Figura 4, se vê representado um diagrama de estágios de um determinado cruzamento, mostrando graficamente os movimentos que podem ser realizados em cada estágio do ciclo pelos respectivos grupos de semáforos (G1 e G2). Como exemplo, no estágio 1 da Figura 4, a via da horizontal (traço em vermelho) tem seus movimentos interrompidos, enquanto a via da vertical (traços em verde) tem 3 movimentos permitidos. Enquanto que, no estágio 2, movimentos verticais são interrompidos para dar passagem a 3 movimentos horizontais permitidos.

Denomina-se ciclo a sequência completa dos estágios da programação de um local semaforizado (CONTRAN, 2014). A duração do ciclo (tempo de ciclo) em uma interseção, é definida pela soma dos tempos de todos os estágios programados para o controle do tráfego no local, como ilustrado na Figura 5.



**Figura 5.** Ciclo Semaforico.

Fonte: Adaptado de CONTRAN (2014) pela autora.

Com base na Figura 5, considerando um ciclo de 80 segundos (80s), observa-se a duração e a sequência dos intervalos luminosos e estágios por meio das barras horizontais, associando-os aos grupos semaforicos correspondentes. Analisando a representação da Figura 5, nota-se que, enquanto o grupo semaforico G2 teve seu fluxo interrompido (barra vermelha) no estágio 1 por 36 segundos, o grupo semaforico G1 concedeu verde por 30 segundos, seguido por 4 segundos de amarelo e, finalmente 2 segundos de vermelho. No estágio 2, observa-se que ao grupo semaforico G2 foi programado um tempo de verde com maior duração que para G1 (38 segundos).

Posto isso, segundo Cucci (2016), a duração do ciclo, assim como o tempo dos estágios, é determinada pela quantidade de tempo necessária para atender a todas as direções de tráfego em uma faixa horária. Esse tempo é calculado conforme as características e volumes médios históricos do tráfego de determinado período, como mostrado na Tabela 4.

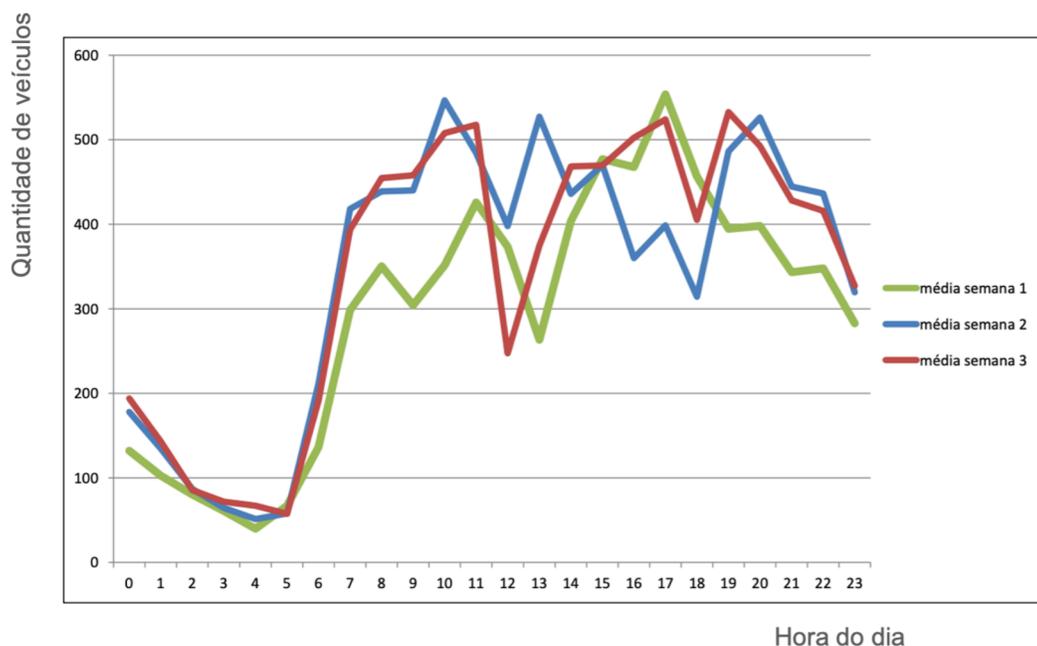
**Tabela 4**  
Tabela horária.

| Faixa horária | Dados médios dos detectores | Tempo ciclo calculado | Tempo ciclo tabela horária |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 0             | 307                         | 47                    | 50                         |
| 1             | 238                         | 45                    |                            |
| 2             | 142                         | 42                    |                            |
| 3             | 116                         | 42                    |                            |
| 4             | 130                         | 42                    |                            |
| 5             | 254                         | 44                    |                            |
| 6             | 844                         | 65                    | 72                         |
| 7             | 1361                        | 117                   | 120                        |
| 8             | 1399                        | 127                   |                            |
| 9             | 1320                        | 95                    |                            |
| 10            | 1432                        | 99                    |                            |
| 11            | 1388                        | 108                   |                            |
| 12            | 1391                        | 121                   |                            |
| 13            | 1422                        | 108                   |                            |
| 14            | 1421                        | 118                   |                            |
| 15            | 1480                        | 146                   | 144                        |
| 16            | 1452                        | 151                   | 160                        |
| 17            | 1467                        | 166                   |                            |
| 18            | 1445                        | 158                   | 120                        |
| 19            | 1316                        | 116                   |                            |
| 20            | 1123                        | 87                    | 90                         |
| 21            | 868                         | 68                    |                            |
| 22            | 840                         | 68                    |                            |
| 23            | 625                         | 55                    |                            |

Fonte: Adaptado de Cucci (2016) pela autora.

A Tabela 4 reflete o volume de carros, hora a hora, bem como os tempos de ciclo de cada horário calculados a partir do volume de veículos detectados. Para tanto, são implantados dispositivos de detecção veicular (os detectores) nos locais, a partir dos quais se deseja coletar a informação de fluxo veicular. Com isso, é realizado um agrupamento entre ciclos próximos, que gerará a tabela horária para esse cruzamento. Esses dados permitem configurar os diversos planos nos controladores de tráfego, para acompanhar as variações de demanda histórica, de forma a reduzir as esperas dos usuários e, conseqüentemente, os congestionamentos e os problemas gerados por ele.

No entanto, o uso de multiplanos para diferentes horários do dia não se mostrou suficientemente eficaz para atender às mudanças de comportamento ocorridas em grandes centros (Ameddah, Das & Almhana, 2018). Se comparadas semanas diferentes, também existem comportamentos díspares de volume de tráfego, como mostrado na Figura 6.



**Figura 6.** Variação do volume de trânsito (semanas).  
Fonte: Cucci (2016).

O comportamento identificado na Figura 6 pode ocorrer em função de fatores que interferem na demanda e na capacidade como chuva, acidentes, manifestações, obras, etc. (Cucci, 2016).

O uso de equipes em campo para monitorar o comportamento de trânsito pode auxiliar por meio da informação das variações pontuais que ocorrem, mas não se mostra eficaz, por limitações na comunicação que comprometem a agilidade e a fidelidade das informações (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005).

O tráfego urbano é um organismo vivo e diante de todas essas variações é crucial que da mesma maneira que a demanda se altera, os planos semafóricos acompanhem essas mudanças. Os semaforos em tempos fixos não apresentam características para atender a essa aleatoriedade representada anteriormente nas Figuras 3 e 6. Eles apenas têm temporizações diferentes dependendo da hora do dia e dia da semana.

Mas, no mundo contemporâneo, estamos expostos a outras e novas condições que demandam o desenvolvimento de modelos de controle semafórico que enfatizem e

priorizem o atendimento de acordo com as variações aleatórias do comportamento do trânsito a cada momento. Nesse sentido, surgem os semáforos atuados, acionados pelo próprio tráfego, em que o tempo de verde de uma aproximação é influenciado pela detecção imediata de veículos, sendo ajustado continuamente. Esses ajustes ocorrem em tempo real, obtendo dados de detectores de veículos colocados estrategicamente nas ruas, para registrar as demandas de tráfego. Cada aproximação está sujeita aos tempos mínimo e máximo de verde e alguns estágios podem ser ignorados, se não houver demanda em seu respectivo detector (Bonetti & Pietrantonio, 2006; Yuki, 2008).

Existem vários tipos de detectores, sendo que os de uso mais comum atualmente são (Taher et al., 2016; Lopes, Santos & Bastos, 2016):

- Detector de loop ou laço indutivo: Este é o tipo de detector mais comum. É formado por algumas voltas de fio (bobina) embutidos na via, no qual circula uma pequena corrente elétrica. Quando uma massa de metal passa sobre ele, o circuito detecta a alteração ocorrida, indicando a passagem ou presença de um veículo sobre o sensor.
- Detector por Vídeo: Câmeras conectadas a um sistema capaz de codificar o vídeo em busca de ações, detecta a presença de veículos numa área previamente mapeada.
- Detector Magnético: Seu funcionamento é similar ao do laço indutivo, diferenciando-se por meio do método construtivo e do custo.
- Detector de Infravermelho: Um detector que detecta radiação no espectro infravermelho.

Pelo exposto, os semáforos atuados se mostram mais eficientes que os semáforos em tempos fixos. Estudo realizado na Faculdade de Engenharia Eletrônica, Menoufia University, no Egito (Taher et al., 2016), respalda essa afirmação, pois entendendo a importância da otimização do comportamento dos controladores de tráfego, para aumentar o fluxo, foi realizada uma simulação comparando as diferentes técnicas utilizadas pelos semáforos em tempos fixos e semáforos atuados. Para tanto, foi utilizado o simulador *SUMO* (em inglês *Simulation of Urban Mobility*) para simulação microscópica de trânsito no centro da cidade de Ottawa, onde foram avaliados dois valores, a saber: o deslocamento dos veículos e o tempo médio de viagem desses veículos,

até atingirem seu destino. Como resultado dessa simulação, observou-se que o número médio de carros em deslocamento usando a solução atuada foi 16% maior em comparação com a solução de tempos fixos (Taher et al., 2016). Adicionalmente, também foi analisado o tempo médio de viagem, obtendo como resultado um menor tempo de viagem com o uso da solução atuada, pois utilizou um maior tempo de verde. Com isso, o estudo mostra um desempenho superior dos semáforos atuados sobre os semáforos em tempos fixos.

As variações da demanda em uma aproximação são significativas e apresentam um caráter aleatório. O semáforo a tempos fixos não apresenta características para atender essa variação aleatória. O que norteia o semáforo atuado pelo tráfego é primordialmente esse atendimento. Na atuação total, o conceito que embasa a operação é aquele em que as demandas que competem em uma interseção são igualmente importantes, e que não há nenhum padrão de chegada estruturado em qualquer uma das aproximações orientando a priorização de um movimento [...]. (Yuki, 2008, p.10).

No entanto, os semáforos atuados tem uma limitação importante, que reduz sua aplicação em áreas adensadas – por não operar com um tempo de ciclo fixo, não existe sincronismo com os cruzamentos adjacentes e, portanto, não pode operar em rede (Cucci, 2018).

Como visto, os semáforos vêm sofrendo uma importante evolução, visando uma mobilidade urbana mais eficiente. Com o desenvolvimento da tecnologia, foi possível estender a condição de semáforos por demanda de tráfego para as redes. Surgiu então o que ficou denominado como “semáforos em tempo real” ou “semáforos inteligentes”, que reagem às variações de tráfego de forma a adequar os tempos semaforicos ao tráfego a cada instante (Cucci, 2016).

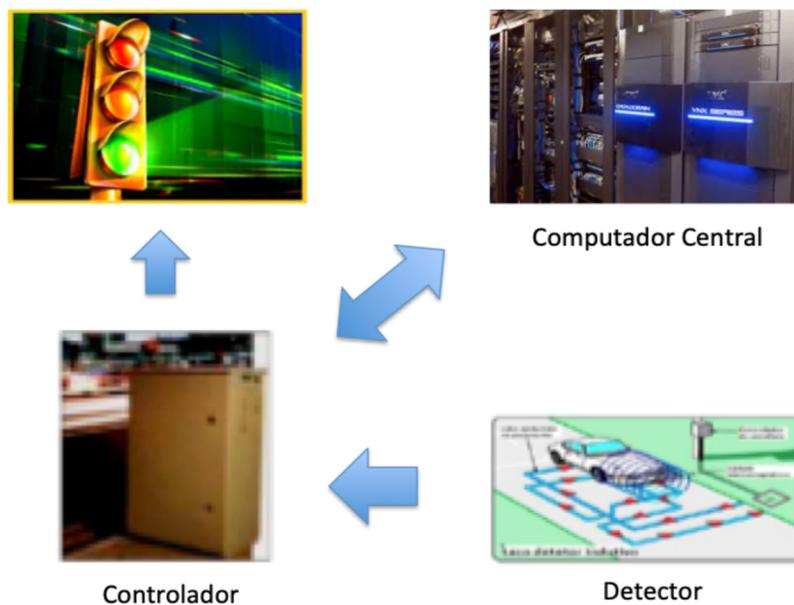
Conforme salientado por Ming (1997, p.2), existem diferenças significativas entre o sistema de controle em tempo real e o de sistemas atuados.

Nos sistemas atuados, os tempos semaforicos também não são fixos, variando de um mínimo a um máximo. Porém, neste caso, não existe um cálculo de otimização visando minimizar os atrasos e o número de paradas na área sob controle. O sistema atuado simplesmente, a partir de um tempo de verde mínimo, prolonga o verde à medida que detecta a aproximação de mais veículos até atingir o verde máximo.

Segundo Cucci (2018), o modo em tempo real, só pode operar centralizado, ou seja, há necessidade de um computador com um software especializado e toda uma infraestrutura formada por redes de transmissão, controladores e detectores.

Os sistemas que operam em tempo real devem ter a capacidade de se adaptar imediatamente ou muito rapidamente às condições de tráfego e otimizar seu comportamento. Para tanto, além dos algoritmos de processamento, esses sistemas recebem informações sobre o estado do tráfego enviado pelos sensores colocados nas vias, possibilitando recalculando a duração e a sincronização dos tempos de verde para minimizar o congestionamento, ou seja, para minimizar o tempo médio de espera e a duração das filas (Mustapha, Salah-ddine, & Elmaimouni, 2018).

A Figura 7 ilustra o funcionamento do sistema de controle em tempo real.

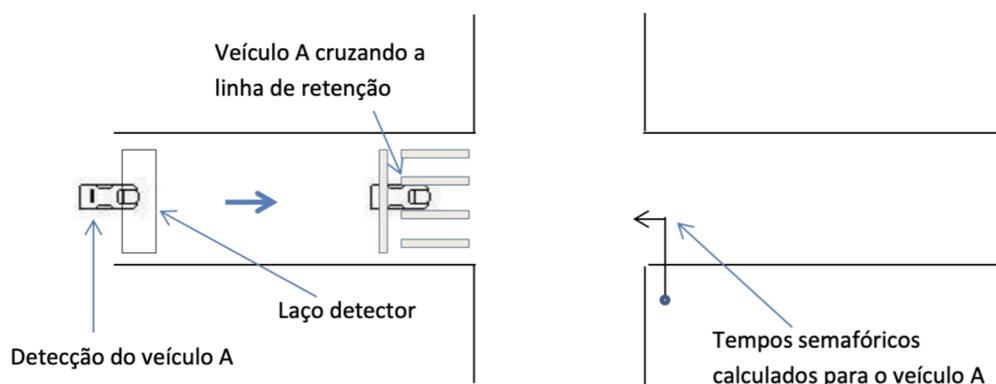


**Figura 7.** Esquema de controle de semáforo em tempo real.

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base na Figura 7, a detecção do fluxo de veículos ocorre próximo aos semáforos por meio de sensores estrategicamente posicionados, enviando essas informações para o controlador, que por sua vez envia para uma central, de forma automática, recebendo, em um controlador de campo, as indicações temporais com as

variações dos tempos necessárias para acompanhar a evolução do tráfego. Esse processo é realizado de maneira bastante ágil para que o motorista do veículo detectado pelos sensores possa usufruir da mudança dos tempos, se o comportamento do tráfego se alterar (Ming, 1997). A Figura 8 ilustra como os tempos semafóricos calculados pelo sistema em tempo real são implementados imediatamente, possibilitando que os veículos detectados se favoreçam dessa mudança de tempos.



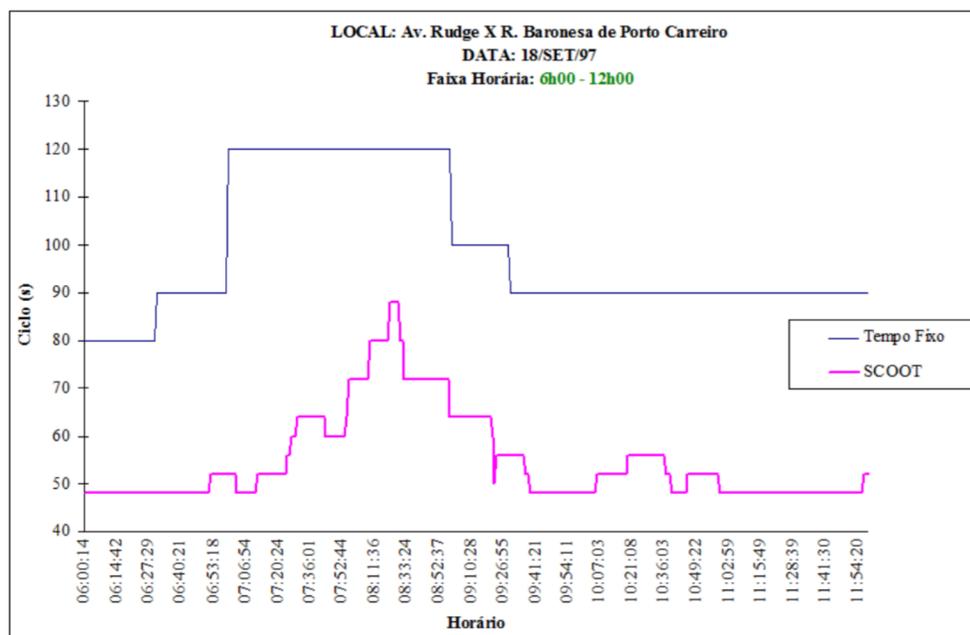
**Figura 8.** Alteração dos tempos semafóricos.  
Fonte: Ming (1997).

Pela análise da Figura 8, pode-se observar que os detectores de veículos são posicionados antes da linha de retenção, para que os tempos semafóricos sejam calculados e possibilitem a alteração para o mesmo ciclo. Importante reiterar que o sistema não implementa os tempos individualmente para cada veículo, mas o faz para o conjunto dos veículos detectados em um ciclo e os implementa no mesmo ciclo em que os veículos foram detectados (Ming, 1997).

Para Cucci (2016, p.28), o sistema semafórico em tempo real proporciona expressivas reduções, principalmente no número de paradas, no atraso global da rede, na emissão de poluentes e no consumo de combustível. “Com esta forma de operação, há uma grande redução nas folgas e ociosidades”, afirma ele.

Utilizando-se como base as programações realizadas para os semáforos em tempos fixos, calculadas a partir de dados históricos e os dados obtidos dos controladores

em tempo real, a Figura 9 demonstra a diferença de resultados entre esses dois modelos, num cruzamento de São Paulo- Av Rudge x Rua Baronesa de Porto Carreiro.



**Figura 9.** Gráfico de comparação Tempos Fixos x Tempo Real.

Fonte: Cucci (2016).

Para exemplificar as diferenças encontradas entre os dois sistemas, se tomarmos como referência o horário das 08:33:24 apresentado na Figura 9, a programação por tempos fixos, calculada a partir de dados históricos, teria um tempo de ciclo de 120 segundos. No entanto, o que mostra o sistema em tempo real, identificado na Figura como *SCOOT* (*Split Cycle Offset Optimization Technique*), sistema utilizado pela cidade de São Paulo no período da análise, é que foi realizado um tempo de ciclo menor que 90 segundos. Nesse sentido, se utilizado o sistema de tempos fixos, os motoristas ficariam retidos no cruzamento por 30 segundos mais, aproximadamente um terço do tempo mais do que o necessário, acarretando com isso maiores tempos de espera, filas e potencialmente gerando congestionamentos.

Outra análise possível, utilizando essa mesma Figura 9, é a comparação dos menores tempos de ciclo configurados pelo sistema de tempos fixos e pelo sistema em tempo real; pois enquanto os menores ciclos seriam de aproximadamente 50 segundos

para tempo real, na configuração dos sistemas de tempos fixos, estariam programados para ciclos de 80 segundos. É claro notar que se fossem utilizadas as programações previamente armazenadas para uso em tempos fixos, os motoristas teriam um tempo de espera muito maior que o necessário. Isso se deve às folgas que devem ser obrigatoriamente inseridas nos cálculos dos tempos fixos, como forma de compensar as aleatoriedades do trânsito. Outros estudos, a exemplo deste, avaliando o desempenho do tráfego em intersecções com controle em tempos fixos e em tempo real, foram realizados, a exemplo de Loureiro, Gomes e Leandro (2005), os quais confirmaram uma crescente superioridade do controle em tempo real sobre planos fixos à medida em que as demandas de pico atingem o seu ápice.

A utilização da tecnologia dos semáforos operando em tempo real (semáforos inteligentes) possibilita um melhor aproveitamento da capacidade do sistema viário disponível, provendo maior fluidez, conforto e segurança para os motoristas (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005), trazendo também, como benefício, uma melhor distribuição de tempos para os usuários incluindo, neste caso, os pedestres. Segundo a *TfL* (2018), 85% das pessoas esperam menos de 30 segundos para atravessar as vias (Kobie, 2018). Com isso, semáforos com tempo de travessia adequados são mais seguros para os pedestres, pois eles não precisam utilizar uma brecha na via principal para atravessar (Bonetti & Pietrantonio, 2006).

A maior parte dos autores que se dedicam a estudar os semáforos inteligentes concordam com a importância da evolução para esse tipo de controle, assim como os seus benefícios para o meio ambiente, economia e para a qualidade de vida das pessoas em metrópoles (Cavalheiro & Quaresma, 2020).

Embora o desenvolvimento da tecnologia para sistemas de controle de semáforos tenha permanecido durante todo esse período, o que se nota é que desde então não surgiu uma nova tecnologia em controle semafórico tão eficaz quanto o adaptativo. É possível notar semelhanças nas reflexões dos autores que se debruçam sobre esse tema, tendo como foco a evolução das variáveis utilizadas para o funcionamento do sistema de controle semafórico inteligente: os algoritmos que permitem controlar o tráfego e principalmente, os métodos de detecção dos veículos, priorizando a detecção dinâmica (Cavalheiro & Quaresma, 2020).

Buscando otimizar os algoritmos, estudos e análises são feitos buscando implementações por meio de diferentes soluções, como teoria das filas, redes neurais, lógica fuzzy, com o foco de obter menores tempos de fila e maior fluidez no tráfego. E, no que tange aos métodos de detecção, várias alternativas estão sendo utilizadas e implementadas para aprimorar a detecção dos veículos presentes no trânsito e, conseqüentemente, a quantidade deles. Dentre as possibilidades de detecção destacam-se as câmeras, que têm a capacidade de capturar e gravar imagens e vídeos que, processados em tempo real, permitem analisar o comportamento do tráfego; sistemas de monitoramento utilizando inteligência artificial, por meio de câmeras de segurança que se encontram ao longo das vias; informações de atrasos obtidas dos motoristas pelas atualizações instantâneas dos software de navegação (*Waze, Google Maps*) usados nos smartphones e/ou nos veículos; assim como dados obtidos de radares, *GPS (Global Positioning System)* (Gomes, 2014; Robinson, 2020; *BBC News*, 2019; Mustapha et al., 2018).

Nesse sentido, muitas oportunidades surgem para evoluir os sistemas de controles semafóricos, em grande parte envolvendo uma quantidade relevante de dados já disponíveis para acesso e usando novas tecnologias. Segundo Orosz, professor-associado de engenharia da Universidade de Michigan (*BBC*, 2019), “Se tivermos os dados, podemos chegar a soluções. O mesmo se aplica ao tráfego.”

#### 2.4 SEMÁFOROS INTELIGENTES: EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

Primeiramente, se faz necessário reiterar o funcionamento dos semáforos inteligentes: detectores veiculares coletam dados de tráfego em tempo real e os enviam a um computador com processamento central que, por meio de um algoritmo apropriado, define, entre outros parâmetros, os melhores tempos de verde para cada local da área controlada, no mesmo ciclo semafórico. Este computador, por sua vez, envia de volta as informações calculadas a cada controlador de campo, que executa a ação, alterando as temporizações vigentes (Cucci, 2016).

A definição do funcionamento foi lembrada porque várias soluções tecnológicas que geram melhorias no tráfego, apesar de se intitularem como semáforos inteligentes,

não atendem ao conceito de forma devida. Neste sentido, no Brasil existem várias implementações rotuladas como semáforos inteligentes, mas que seu funcionamento não o caracteriza como tal, conforme mostrado na Tabela 5.

**Tabela 5**

Cidades com soluções intituladas equivocadamente como semáforos inteligentes.

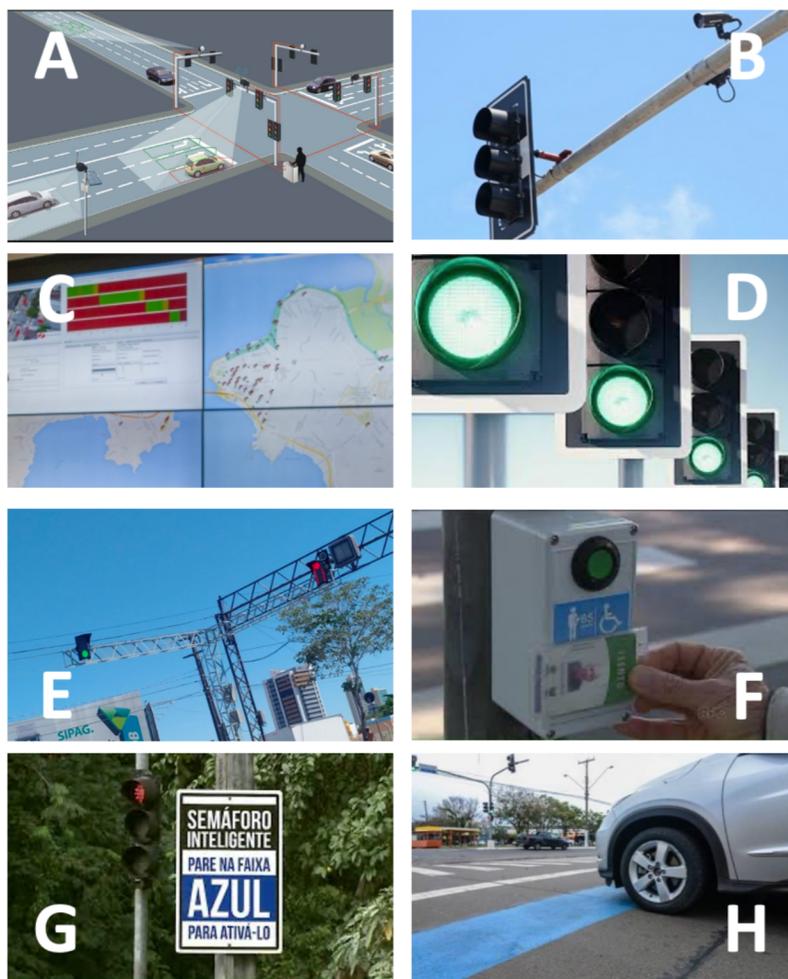
| Cidade        | Identificação           | Detecção      | Solução implementada  |
|---------------|-------------------------|---------------|---|
| Aracaju       | Figura 10A/<br>10B      | Câmeras       | A detecção de veículos é realizada por meio de imagens capturadas por câmeras posicionadas nos cruzamentos. As mudanças de temporização são realizadas automaticamente, porém de maneira isolada, sem considerar a rede de semáforos  |
| Florianópolis | Figura 10A/<br>10B/ 10C | Câmeras       | A detecção de veículos é realizada por meio de imagens capturadas por câmeras posicionadas nos cruzamentos. A partir da captura das imagens, essas são monitoradas e as ações para mudança dos tempos dos semáforos são realizadas manualmente, por meio de operadores localizados na Central de Controle de Tráfego da cidade. |
| Boa Vista     | Figura 10D              | Não se aplica | Os semáforos são sincronizados para ficarem abertos ou fechados simultaneamente (onda verde), proporcionando maior fluidez na passagem dos veículos, permitindo que os mesmos usufruam de uma   |

|                |            |                 |  |
|----------------|------------|-----------------|--|
|                |            |                 | sequência de sinais verdes ao longo de trechos da via caso o motorista obedeça a uma determinada velocidade.   |
| Campina Grande | Figura 10E | Câmeras         | A detecção de veículos é realizada por meio de imagens capturadas por câmeras posicionadas nos cruzamentos. A captura das imagens e identificação dos elementos, contribui para o monitoramento do trânsito.   |
| Curitiba       | Figura 10F | Botoeira        | Botoeira especial acoplada ao semáforo, acionada pela aproximação de cartão de identificação ("Cartão respeito"), permite aumentar o tempo de verde para a travessia de pedestres com dificuldade de locomoção (idosos e pessoas com deficiência).                     |
| Londrina       | Figura 10G | Laços Indutores | A detecção dos veículos é efetuada por laços indutores, colocados numa faixa azul, próximo à faixa de pedestres. Com isso o semáforo muda automaticamente para verde, sem analisar a rede em que está inserido e sincronizar a temporização com as demais intersecções |
| Rio Claro      | Figura 10H | Laços Indutores | A detecção dos veículos é efetuada por laços indutores, colocados numa faixa azul, próximo à faixa de pedestres. Com isso o semáforo   |

|          |               |                 |   |
|----------|---------------|-----------------|---|
|          |               |                 | muda automaticamente para verde, sem analisar a rede em que está inserido e sincronizar a temporização com as demais intersecções |
| Curitiba | Não se aplica | Laços indutores | Quando o veículo para num determinado ponto, automaticamente muda para verde, sem para isso analisar a rede que está inserido.    |

Fonte: Cavalheiro e Quaresma (2020).

Na literatura analisada e resumida na Tabela 5 pode-se observar algumas implementações realizadas em cidades do Brasil; soluções que utilizam diferentes formas de detecção dos veículos, por meio de imagens capturadas por câmeras, por laços indutivos ou pelo posicionamento do veículo sobre uma faixa de detecção e, baseado nestas informações, alteram automaticamente o semáforo para o período de verde. No entanto são exemplos em que não são realizados cálculos para a obtenção dos melhores tempos de verde para aquele determinado local, nem tão pouco consideram a rede de semáforos em que aquele semáforo está inserido. A Tabela 5 contém exemplos de implementações, bem como a associação das mesmas as imagens das soluções utilizadas, representadas na Figura 10.



**Figura 10.** Exemplos de soluções intituladas equivocadamente como semáforos inteligentes.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir das diferentes imagens apresentadas na Figura 10, observa-se o funcionamento das soluções intituladas equivocadamente como semáforos inteligentes.

Em relação às outras cidades no mundo nota-se que estão evoluindo no sentido de implantar novas tecnologias e soluções de controle semafórico, buscando melhorias no tráfego e na qualidade de vida das pessoas, porém ainda não realizaram a implementação dos semáforos inteligentes, estando num processo evolutivo, indo ao encontro da solução em tempo real. Como exemplos desta situação encontram-se Nova York e Israel (Schwartz, 2011; Dori, 2017).

A solução em funcionamento em Nova York obtém informações por meio de uma rede de sensores, leitores e câmeras que permitem os ajustes dos sinais de trânsito rapidamente. A experiência em Nova York conta com o programa *Midtown in Motion* que faz uso de sensores de micro-ondas, câmeras de vídeo e leitores, que rastreiam o tráfego, identificando congestionamento de veículos. Esses dados são enviados para uma central de controle, utilizando a rede sem fio de Nova York, dedicada a aplicativos de segurança pública e serviços públicos. Nessa central são verificados os problemas apontados e tomadas as devidas medidas para alterar de forma não automática os tempos dos semáforos. Adicionalmente, essa informação é compartilhada com os motoristas, por meio de seus telefones celulares, para que, se possível evitem a região (Schwartz, 2011).

Nova York também faz uso de uma tecnologia para acelerar o trajeto dos ônibus, dando prioridade nos semáforos quando eles se aproximam. Para tanto foram priorizadas linhas de ônibus com alto volume de ocupação, obtendo, em algumas rotas, aumento de 25% nas velocidades dos mesmos. Esse sistema demanda a instalação de um software nos semáforos e nos ônibus que farão as rotas escolhidas (Guse, 2019).

Em se tratando de Israel, o sistema utilizado é em tempos fixos, tendo para isso sensores que capturam a informação da via e alteram as condições dos tempos de verde baseados em dados históricos e não na situação apresentada na via naquele momento. Além disso, muitos desses detectores estão inoperantes, necessitando de manutenção para retomarem seu funcionamento. Nesse sentido, o objetivo das autoridades rodoviárias está no investimento de novas formas de detecção por meio de câmeras ou radares, instalando diferentes sistemas e testando seus respectivos desempenhos. Para tanto, várias *startups* estão desenvolvendo inovadoras tecnologias, porém no caso de Israel existe uma barreira adicional para a substituição das tecnologias convencionais: a necessidade de aprovação de um comitê interministerial, por questões de segurança impostas no país. Adicionalmente, um algoritmo desenvolvido em Israel, utiliza a infraestrutura de sensores existente para otimizar o tráfego, obtendo dados de ocupação e alterando os tempos de verde. Esse algoritmo passou por alguns testes e se mostrou eficiente, reduzindo em alguns casos o tempo de espera em 50% (Dori, 2017).

No entanto, existem várias implementações efetivas de semáforos inteligentes ao redor do mundo, inclusive no Brasil; embora por meio de implementações distintas,

alterando os modelos de detecção, bem como os agentes priorizados na solução; sendo eles pedestres, transportes individuais, veículos de emergência, transportes coletivos, entre outros (Cavalheiro & Quaresma, 2020).

Exemplos de aplicação serão abordados, para que seja compreendida a disseminação da implementação desse tipo de controle semafórico, assim como as variações de seu uso. A descrição se iniciará por Londres, em função do protagonismo desempenhado por essa metrópole na história e evolução dos semáforos inteligentes, assim como pela relevância da expertise londrina, utilizada na implantação realizada na década de 1990 em São Paulo (Villanova, 2005).

Desde 1950, Londres otimiza os deslocamentos por meio do uso de sensores que monitoram o tráfego, com isso ajustam automaticamente os semáforos, adequando os tempos de verdes necessários para atender a demanda de veículos. Atualmente, Londres tem uma extensa rede de semáforos inteligentes controlados pelo sistema *SCOOT* que detectam o tráfego e ajustam os tempos dos semáforos para gerenciar filas e dar prioridade aos ônibus, reduzindo os atrasos em 13%. Londres, em sua frequente evolução, iniciou um novo projeto para otimizar os tempos de semáforos, reduzindo atrasos dos usuários do modal rodoviário. Trata-se de um novo sistema, o *RTO- Real Time Optimization*, incluindo novas fontes de dados, compartilhando dados com veículos conectados, informando sobre condições atuais ou esperadas, e que poderão ser utilizados nos veículos autônomos no futuro. Esse sistema, cujo desenvolvimento tem duração prevista de 10 anos, embora com entregas parciais e frequentes, será essencial para as ações planejadas pelo prefeito para melhorar a qualidade do ar, reduzir congestionamentos e reduzir o atraso no deslocamento das pessoas. "Quando o *RTO* for introduzido com sucesso, Londres será uma vitrine para soluções de tráfego inteligentes para megacidades em todo o mundo" (*London Road Safety Council*, 2018).

Na cidade de York na Inglaterra, semáforos inteligentes foram testados e sugeriram aos motoristas a velocidade que eles deveriam dirigir para chegar ao próximo semáforo quando estiverem verdes. Essa é uma tentativa de reduzir o congestionamento e reduzir as emissões dos veículos por meio de uma condução mais eficiente e de testes para direção sem motoristas (Marshall, 2018).

Outra solução, identificada como *smart lights*, aplicada a Milton Keynes - Inglaterra, se utiliza de câmeras instaladas em estradas para examinar o tráfego e reconhecer diferentes tipos de veículos, como ônibus, bicicletas e ambulâncias, gerando um tempo de verde mais longo que o normal. Para tanto será utilizada inteligência artificial para reconhecer esses diferentes tipos de veículos e coletar dados que servirão para vinculá-lo ao sistema de gerenciamento de tráfego, obtendo mais eficiência para entender em tempo real o que está acontecendo nas vias e reagir da maneira apropriada, priorizando certos movimentos no trânsito (Morrison, 2017).

No entanto, nem todas as soluções são pensadas para os veículos. Com o objetivo de estimular as caminhadas e torná-las mais agradáveis, a cidade de Londres passou a utilizar os semáforos inteligentes para reduzir o tempo de espera dos pedestres. Nesse sentido duas maneiras distintas do conceito de semáforos inteligentes são utilizadas; o primeiro, detectando o número de pedestres e ajustando automaticamente o tempo dos semáforos para minimizar o tempo de espera deles; e o segundo, mantendo o sinal verde para o pedestre continuamente, mudando para vermelho somente quando algum tráfego de veículo for detectado, gerando pouco impacto no tráfego, mas muitas melhorias para os pedestres (Schmitt, 2018).

Adicionalmente, em função das estimativas de crescimento da população de Londres para 10 milhões até 2030, novas maneiras são pensadas para tornar o movimento das pessoas mais eficiente. Nesse caso, o foco foram os ciclistas, desenvolvendo um sistema de controle de tráfego adaptativo que detecta ciclistas, utilizando radar e imagens térmicas e, com esses dados, baseado no volume de ciclistas, ajustar os tempos de verde. Boris Johnson (2015) destaca “Mais uma vez, Londres lidera o caminho, ao realizarmos os primeiros testes mundiais de tecnologia com potencial para trazer benefícios significativos aos ciclistas” (Chalmeton, 2015).

Nota-se que as iniciativas adotadas por Londres focam na utilização de sistema de controle semafórico inteligente, variando sua utilização pelo reconhecimento do fluxo, por meio de câmeras, imagens por radar, inteligência artificial, captura de dados (volume e característica dos veículos), assim como calor do corpo. Esses dados são utilizados para reconhecer a demanda e reagir em tempo real, mudando os tempos de verde e vermelho dos semáforos.

Já, no Japão, as soluções vêm sendo implantadas desde a década de sessenta, para minimizar congestionamentos, poluição e os então crescentes acidentes de trânsito. A tecnologia implantada para controle de tráfego à época foi a de sistemas de tempos fixos, porém com a inovação da tecnologia e as soluções disponíveis atualmente, que permitiu que o sistema evoluísse. O sistema passou a coletar dados de maneira massiva, por meio de sensores, analisando-os e ajustando os semáforos para atender à necessidade do tráfego do momento. Em posse desses dados, o sistema permite prever as condições historicamente encontradas e implantar o melhor controle para o semáforo (Tsuruta, 2014).

Valendo-se de parcerias com montadoras de automóveis, o Japão desenvolveu uma nova tecnologia na qual torres de comunicação avisam aos motoristas, sinalizando e emitindo alarme dentro do veículo, quando identificada a presença de pedestres em ruas laterais que eles estejam entrando, evitando com isso acidentes (Road Traffic, 2015).

A Austrália utiliza o sistema *SCATS* (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) desenvolvido localmente e se apresenta como um dos sistemas de controle de semáforos mais implantados no mundo, depois do *SCOOT*. Esse sistema, caracterizado como semáforos inteligentes, reage ao comportamento dos carros registrados pelos detectores que se encontram nas ruas, enviando os dados para uma central que revisa e modifica os tempos de verde para atender à demanda. Além da Austrália, outros lugares fazem uso do *SCATS*, a saber: Nova Zelândia, Hong Kong, Shanghai, Amman, Dublin, entre vários (Levinson, 2018).

O governo australiano continua investindo em soluções para melhoria dos congestionamentos e, entre as ações priorizadas está a ampliação do uso dos semáforos inteligentes, aumentando a instalação em Sydney e em centros como Wollongong e Newcastle, em função dos benefícios obtidos no país com a redução de 15% do número de paradas no tráfego (Liberal, 2019).

Em se tratando do Brasil, algumas cidades fazem ou fizeram (no caso de São Paulo) uso de semáforos inteligentes buscando se beneficiar pelas melhorias advindas de sua implantação. A Figura 11 ilustra as implementações descritas na Tabela 6, onde estão

relacionados exemplos de cidades, bem como o ano em que foram instalados e o respectivo sistema implantado.

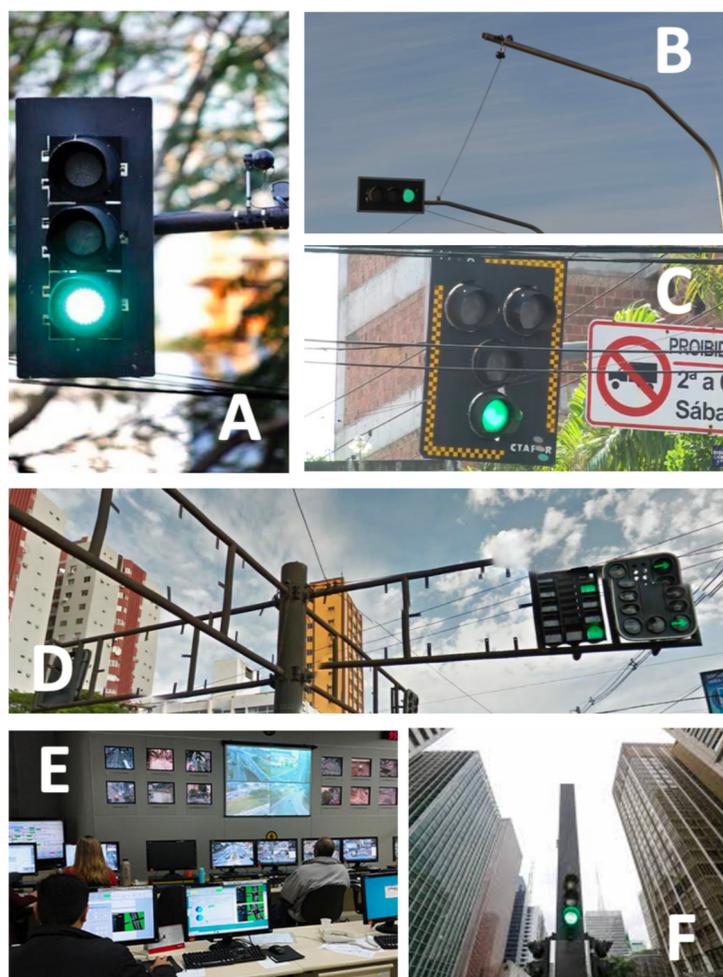
**Tabela 6**

Implementações de semáforos inteligentes no Brasil.

| Cidade         | Identificação | Sistema utilizado | Início da operação | Informações adicionais   |
|----------------|---------------|-------------------|--------------------|--|
| Belo Horizonte | Figura 11A    | SCATS             | 2014               | Implantado no principal eixo de conexão que possui grande fluxo de tráfego, principalmente, nos horários do início da manhã e do final da tarde. A tecnologia implantada tem detectores virtuais com câmeras de vídeo. |
| Caxias do Sul  | Figura 11B    | SCATS             | 2019               | Os detectores são câmeras apontadas para o chão, fixadas à frente das sinaleiras e que analisam a passagem dos veículos com base na distância entre eles.  |
| Fortaleza      | Figura 11C    | SCOOT             | 2001               | Implantado na área mais congestionada da malha viária de Fortaleza para promover uma gestão mais eficiente e eficaz dos deslocamentos viários.   |

|               |            |               |      |  |
|---------------|------------|---------------|------|--|
| Foz do Iguaçu | Figura 11D | SCOOT         | 2017 | Uso de fibra ótica, priorizando a abertura do semáforo por aproximação para ônibus, estendido para viaturas do Samu e ambulâncias. |
| Porto Alegre  | Figura 11E | SCATS         | 2016 | Instalado numa avenida em ampliação implantação em outras vias da cidade.  |
| São Paulo     | Figura 11F | SCOOT e ITACA | 1996 | Implantados 1256 semáforos inteligentes, que atualmente não estão em funcionamento.  |

Fonte: Cavalheiro & Quaresma (2020).



**Figura 11.** Exemplos de implementações de semáforos inteligentes no Brasil.  
 Fonte: Elaborado pela autora.

As soluções contidas na Tabela 6, refletem algumas implementações de semáforos inteligentes realizadas no Brasil, divergindo entre elas pelos algoritmos de otimização utilizados, pelo provedor da solução e/ ou pelo método de detecção. Cidades como Belo Horizonte, Caxias do Sul e Porto Alegre são exemplos de implantação que se utilizam da tecnologia australiana *SCATS* e detectam os veículos por meio de câmeras (vídeo detecção). Os semáforos de Fortaleza e Foz do Iguaçu são controlados pelo sistema com tecnologia inglesa *SCOOT* utilizando sensores físicos estrategicamente posicionados para detectar o fluxo de veículos. São Paulo iniciou sua implementação em 1996, com dois quintos dos semáforos utilizando a tecnologia espanhola *ITACA* (*Intelligent Traffic*

*Adaptative Control Area*) e três quintos utilizando a tecnologia *SCOOT*, ambos com sensores físicos para detecção dos veículos. Todas as soluções representadas têm em comum o envio automático das informações capturadas para um computador central, que as processa em tempo real, ajustando os parâmetros dos semáforos necessários para atender a demanda de veículos (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005).

Embora existam cidades em patamares distintos no que tange a implementação de tecnologias semaforicas, os casos relacionados neste capítulo permitem vislumbrar a oferta de alternativas e tecnologias disponíveis relacionadas a semáforos inteligentes, bem como outras iniciativas e possibilidade de implementações que podem contribuir com a mitigação dos impactos gerados pela crise de mobilidade urbana tão presente nas metrópoles.

### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO E DELINEAMENTO DE PESQUISA

Este estudo é de natureza qualitativa, com abordagens descritiva e exploratória. Em particular, nesta pesquisa, busca-se explorar as principais motivações que fizeram com que São Paulo não mantivesse o uso de tecnologias de controle semafórico, bem como busca propor alternativas para que a capital paulista retome a implementação de tecnologia semafórica para obter benefícios relacionados à mobilidade. Triviños (2008) destaca que as pesquisas descritivas têm por objetivo descrever os fatos e fenômenos de determinada realidade. Por sua vez, o tipo de pesquisa exploratória tem como principal objetivo familiarizar-se com um fenômeno a ser investigado (Lakatos & Marconi, 2011). Uma das principais razões para realizar um estudo qualitativo e exploratório se deve ao fato de ter sido pouco explorado, além do fato de que se pode ouvir os participantes e desenvolver um entendimento baseado nas ideias apresentadas (Creswell, 2010).

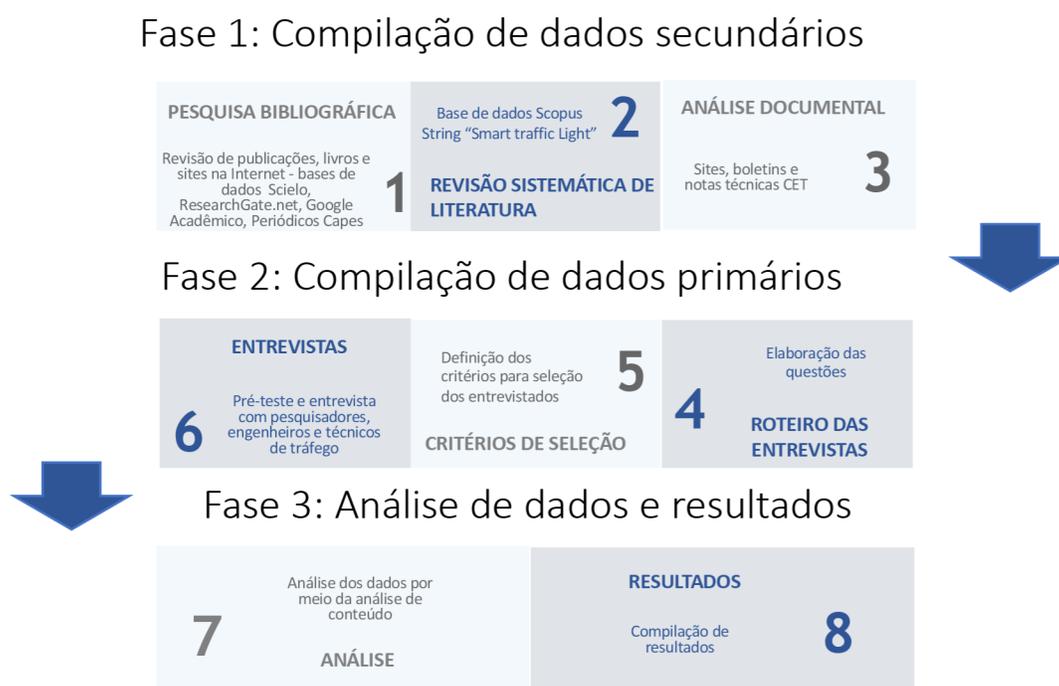
O método de pesquisa utilizado é o de estudo de caso da implantação dos semáforos inteligentes em São Paulo e sua posterior desativação, respaldado pela definição de Yin (2005, p.17) .

“É uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de mundo real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto puderem não ser claramente evidentes”.

A estratégia de pesquisa e coleta de dados foi baseada na triangulação de informações oriundas de pesquisa bibliográfica, revisão sistemática de literatura (RSL), análise documental e entrevistas com especialistas. Segundo Stake (1995), a triangulação é um processo que utiliza dados adicionais para validar ou ampliar as interpretações feitas pelo pesquisador, adotando diferentes percepções para esclarecer o significado por meio da repetição das observações.

Para dar mais clareza às fases da pesquisa, foi desenvolvida a Figura 12 que consolida as atividades em 3 diferentes fases, a saber: Fase 1 concentra a compilação dos

dados secundários, provenientes de pesquisa bibliográfica, RSL e análise documental, seguida da Fase 2, onde foram elaborados e compilados os dados utilizados para formular o roteiro das entrevistas, bem como o próprio resultado das entrevistas e, por fim, a Fase 3, onde se encontram a análise dos dados, realizada por meio da análise de conteúdo, confrontando a literatura, o resultado das entrevistas e documentos e, finalmente, os resultados da pesquisa. As fases se encontram representadas de acordo com a cronologia que ocorreram.



**Figura 12.** Fases da pesquisa.

Fonte: Elaborado pela autora.

## 3.2 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

### 3.2.1 DADOS SECUNDÁRIOS

Para alcançar o primeiro objetivo específico a fim de caracterizar a denominada crise de mobilidade urbana na cidade de São Paulo foi realizado levantamento bibliográfico nas bases da *Scientific Electronic Library Online (SCIELO)*,

ResearchGate.net (rede social para cientistas e pesquisadores), institutos de pesquisa citados e conceituados no Brasil, como IBGE e IPEA, relatórios de pesquisas com mais citações relacionadas à área de estudo, a saber: *World Urbanization Prospects* e Censo Demográfico de 2010, pesquisas em relatórios governamentais, além de literatura sobre Cidades Inteligentes e Sustentáveis. Neste levantamento foram analisados artigos sobre mobilidade urbana com as perspectivas dos problemas gerados, assim como sugestões de alternativas para mitigar seus impactos na cidade. Além disso, foram extraídos de relatórios de pesquisas, dados sobre o mundo, o Brasil e São Paulo. A busca foi realizada nos períodos de setembro de 2019, abril e maio de 2020, utilizando termos em português conforme palavras-chave: mobilidade, urbanização, crise de mobilidade, mobilidade urbana e, em inglês: *urbanization e mobility*.

Para alcançar o segundo objetivo específico a fim de analisar os avanços das tecnologias de controle semafórico foi realizado levantamento bibliográfico nas bases da *SCIELO*, ResearchGate.net, Google Acadêmico, Periódicos Capes, buscando conferências, teses e artigos relacionadas à área de estudo. A busca dos dados foi realizada nos períodos de outubro de 2018, agosto de 2019 e complementados em maio de 2020, utilizando termos em português conforme palavras-chave: semáforos, semáforos inteligentes, tempo real, controle semafórico, onda verde e, termos em inglês conforme palavras-chave: *smart traffic light, traffic light, intelligent traffic light, SCOOT*.

Adicionalmente foi realizada análise documental em sites especializados e outras fontes de notícias, assim como normas e boletins técnicos disponibilizados no site da Companhia de Engenharia de Tráfego (CET). Os documentos analisados fazem parte de um arcabouço técnico das soluções de controle semafórica, bem como sua evolução ao longo do tempo e os benefícios que as mesmas trazem com sua implementação.

Para alcançar o terceiro e o quinto objetivos específicos destinados respectivamente a analisar as tecnologias utilizadas em São Paulo e a analisar o contexto da inserção dos semáforos inteligentes na cidade de São Paulo e sua posterior desativação, foi realizada análise documental em sites especializados, assim como foram considerados normas e boletins técnicos disponibilizados no site da CET de São Paulo. A busca foi realizada utilizando termos em português conforme palavras-chave: semáforos, semáforos inteligentes, tempo real, controle semafórico, onda verde e, termos em inglês

conforme palavras-chave: *smart traffic light*, *traffic light*, *intelligent traffic light*, *SCOOT*. A Tabela 7 descreve os documentos utilizados como fonte de informações e esclarecimentos. Seu conteúdo favorece a explicação e o respaldo, se necessário, às afirmações provenientes das entrevistas. Adicionalmente foi realizada coleta de dados por meio de entrevistas semiestruturadas com pesquisadores, engenheiros e técnicos de tráfego, assim como profissionais com perfil político-administrativo, todos eles experts na área de estudo.

**Tabela 7**  
Documentos pesquisados.

| IDENTIFICAÇÃO | DOCUMENTO  | AUTORES   | ANO  | ACESSO  |
|---------------|--|---|------|---|
| D1            | BT007- Projeto SEMCO: Sistema de Controle de Tráfego em Área de São Paulo  | Cury, P.  | 1977 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/65250/652507-projeto-semco.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/65250/652507-projeto-semco.pdf</a>   |
| D2            | NT 248- Avaliação de tecnologias alternativas de detecção veicular para SCOOT  | Lopes, D., Santos, V. e Bastos, J. V. S.                  | 2016 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/501208/501208-nt-248.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/501208/501208-nt-248.pdf</a>   |
| D3            | NT 236- Os Benefícios da Operação de Semáforos em Tempo Real   | Ager, P. G.   | 2014 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/372177/372177-nt-236.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/372177/372177-nt-236.pdf</a>   |
| D4            | NT 244- Centro de Controle, Engenharia e Gestão de Tráfego   | Duarte, T. L.   | 2016 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/483212/483212-nt244.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/483212/483212-nt244.pdf</a>   |
| D5            | BT 038- O Controle de Semáforos em Tempo Real - A Experiência de São Paulo   | Vilanova, L. M., Cucci, J., Neto e Fernandes, S. R. R.    | 2005 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/65265/65265-t38-%20o%20controle%20de%20semaforos%20em%20tempo%20real.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/65265/65265-t38-%20o%20controle%20de%20semaforos%20em%20tempo%20real.pdf</a> |
| D6            | NT 202- Avaliação antes/depois - Semáforos Inteligentes (SEMIN)  | Ming, S. H. e Fowler, G. R.                               | 1998 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/20767/20767-nt202.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/20767/20767-nt202.pdf</a>   |
| D7            | NT 243- Semáforo: ser ou não ser inteligente? Uma comparação entre o controle semafórico em tempos fixos e o em tempo real           | Cucci, J., Neto   | 2016 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/479737/479737-nt243.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/479737/479737-nt243.pdf</a>   |
| D8            | NT 201- Uma breve descrição do sistema SCOOT   | Ming, S. H. e Fowler, G. R.                               | 1997 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/20764/20764-nt%20201%20revisado.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/20764/20764-nt%20201%20revisado.pdf</a>   |
| D9            | NT 264 - Faixa de Pedestre na Alameda Santos - Detecção Automática de Travessia Sistema Puffin                                       | Freire, L. R.   | 2020 | <a href="http://www.cetsp.com.br/media/107374/107374-0/NT264.pdf">http://www.cetsp.com.br/media/107374/107374-0/NT264.pdf</a>   |
| D10           | Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de intersecções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real | Loureiro, C. F. G., Leandro, M. J. T. L. G. e Pires, C.H. | 2005 | <a href="http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/scoot.pdf">http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/scoot.pdf</a>   |

Fonte: Elaborado pela autora.

Com o intuito de alcançar o quarto objetivo específico, que visa entender o estado da arte da produção científica mundial em controle semafórico inteligente, foi selecionado um método de pesquisa baseado no protocolo da revisão sistemática de literatura (RSL). A busca foi realizada sobre a base de dados *SCOPUS* (<https://www.scopus.com>), aplicando-se a *string* de busca “*smart traffic light*” de forma integral, desconsiderando-se trabalhos em que aparecem apenas parte da *string* de busca indicada. A pesquisa foi realizada no período de agosto de 2020 a outubro de 2020. Foram identificados 104 estudos primários, disponíveis no Apêndice I- Artigos da RSL. Na sequência aplicou-se filtragem, que envolveu dois ciclos de análise. No primeiro ciclo,

foram lidos e analisados os títulos, resumos e fontes de pesquisa, excluindo as publicações que não continham relevância para o estudo em questão. Os critérios de exclusão (CE) utilizados neste ciclo foram os seguintes:

Critério de Exclusão dos estudos (Ciclo 1):

CE1: Soluções para regiões de Baixo Tráfego

CE2: Simuladores de tráfego

CE3: Protocolos de comunicação

CE4: Mobilidade compartilhada

CE5: Sistemas e softwares: de segurança no desenvolvimento de semáforos inteligentes; para comunicação com os veículos de emergência; para definir alternativa de rotas; para realizar a localização de veículos; entre outros.

CE6: Desenvolvimento de Rede Veicular

CE7: Detectores de poluição utilizando *IoT*

CE8: Onda verde

CE9: *Fog computing*

Após a aplicação dos critérios de exclusão do primeiro ciclo, restaram 45 artigos. Para estes artigos, um segundo ciclo foi realizado aplicando critérios de inclusão (CI) e exclusão (CE), quais sejam:

Critérios de Inclusão dos estudos:

CI1: Título claramente relacionado com tráfego inteligente

CI2: Conteúdo relacionado a semáforos inteligentes (em tempo real)

CI3: Conteúdo relacionado a soluções em tempo real

CI4: Conteúdo relacionado a Sensores incluindo Câmeras e *IoT*

CI5: Estudos comparativos entre semáforos tradicionais e semáforos inteligentes

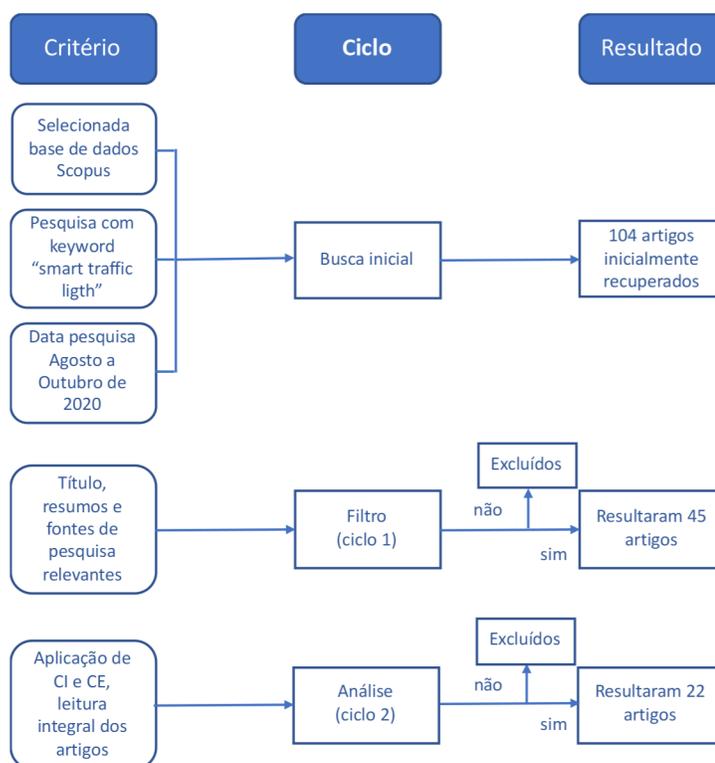
Critérios de Exclusão dos estudos (Ciclo 2):

CE1: Não relacionado a semáforos inteligentes

CE2: Publicado em revistas ou eventos de baixo impacto

CE3: Detalhamento de algoritmos, tornando o estudo extremamente técnico

Após a aplicação dos critérios acima e da leitura integral dos artigos, restaram 22 artigos. As publicações selecionadas cobriram várias perspectivas do controle de semáforos inteligentes, por exemplo, motivações e benefícios da implementação, assim como as tecnologias envolvidas nesses estudos. A Figura 13 mostra o framework da revisão sistemática realizada.



**Figura 13.** Framework da Revisão Sistemática de Literatura.

Fonte: Elaborado pela autora.

Para consolidar e sintetizar a estratégia de pesquisa, assim como as fontes de pesquisa, análise e coleta de dados para cada um dos objetivos estratégicos, e quais questões dentro dos objetivos foram estudadas, foi utilizada a Tabela 8. Esta tabela foi estruturada para possibilitar a visualização de forma esquemática da configuração da pesquisa fornecendo melhor compreensão da estrutura utilizada na pesquisa.

**Tabela 8**

Dados e critérios utilizados na triangulação de informações.

| Objetivo específico   | Teoria aplicada  | Levantamento bibliográfico                                       | RSL   | Análise documental  | Entrevistas  |
|---|--|--|---|---|--|
| Caracterizar a denominada crise de mobilidade urbana na cidade de São Paulo   | Urbanização, crise de Mobilidade Urbana em São Paulo e impacto nas 3 esferas da sustentabilidade | Publicações e artigos de jornais, referentes à Mobilidade Urbana |   |   |  |
| Analisar as tecnologias de controle semafórico implementadas em cidades do mundo  | Evolução das tecnologias e respectivos funcionamentos e contribuições para mobilidade            | Publicações e artigos de jornais, referentes à Mobilidade Urbana |   | Boletins técnicos e notas técnicas da CET-SP e Sites especializados |  |
| Analisar as tecnologias de controle semafórico utilizadas em São Paulo  | Tecnologias de controle semafórico aplicadas em São Paulo no decorrer do tempo                   |  |   | Boletins técnicos e notas técnicas da CET-SP e Sites especializados |  |
| Entender o estado da arte mundial em controle semafórico inteligente  | Tecnologias de controle semafórico em Tempo real   |  | Publicações e artigos de jornais científicos, referentes à Controle Semafóricos em Tempo Real |   |  |
| Analisar o contexto da inserção dos semáforos inteligentes na cidade de São Paulo e sua posterior desativação                 | Histórico da implantação e desativação dos semáforos inteligentes                                |  |   | Boletins técnicos e notas técnicas da CET-SP e Sites especializados | Entrevistas semiestruturadas com pesquisadores, técnicos e administradores relacionados ao tráfego |
| Propor alternativas de tecnologias semafóricas que possam melhorar os problemas relacionados a mobilidade urbana em São Paulo |  | Publicações e artigos de jornais, referentes à Mobilidade Urbana | Publicações e artigos de jornais científicos, referentes à Controle Semafóricos em Tempo Real | Boletins técnicos e notas técnicas da CET-SP e Sites especializados | Entrevistas semiestruturadas com pesquisadores, técnicos e administradores relacionados ao tráfego |

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.2 ENTREVISTAS

A realização de entrevistas como fonte de coleta de dados ratifica um dos aspectos básicos da pesquisa qualitativa, relacionado à busca pela interação com o ambiente de ocorrência do fenômeno e com os atores envolvidos, conforme preconizam Creswel (2010); Triviños (2008). Para alguns tipos de pesquisa qualitativa, a entrevista semiestruturada é um dos principais meios que o investigador tem para realizar a Coleta de Dados (Triviños, 2008).

Foi utilizado um roteiro semiestruturado para as entrevistas, por ser um método mais espontâneo, partindo de questionamentos básicos, porém propiciando abordar outros assuntos, conforme surgirem no decorrer da entrevista, enriquecendo com isso a investigação. A entrevista semiestruturada é um dos instrumentos mais decisivos para estudar os processos e produtos nos quais o investigador qualitativo está interessado e no qual o investigado participa na elaboração do conteúdo da pesquisa (Triviños, 2008).

A entrevista desta pesquisa foi elaborada a partir de um roteiro aderente aos temas pesquisados, contendo questões relevantes ao entendimento do contexto da implantação dos semáforos inteligentes na cidade de São Paulo e seu posterior desuso, assim como às tecnologias semafóricas. Para a formulação das questões foram utilizadas informações obtidas nas pesquisas realizadas até o momento, no intuito de dar clareza e objetividade na dinâmica da entrevista, propiciando obter respostas que atendam aos objetivos da investigação. Por se tratar de uma entrevista semiestruturada, considera-se a possibilidade de inclusão de perguntas adicionais na medida em que novos pensamentos e necessidades forem identificados durante a aplicação da entrevista.

Os entrevistados são pesquisadores, engenheiros e técnicos de tráfego, assim como agentes políticos que poderão contribuir para o que Creswell (2010) reitera como um aspecto importante das entrevistas, o fornecimento de dados históricos. Os entrevistados tiveram seus nomes suprimidos, porém seu perfil está identificado na Tabela 9.

**Tabela 9**  
Entrevistados e perfil profissional.

| Entrevistado | Titulação   | Perfil                  | Experiência profissional | Data da entrevista | Duração (minutos) | Meio da entrevista |
|--------------|---|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| E1           | Engenheiro de Tráfego   | Técnico                 | +20 anos                 | 11/01/2021         | 01:26             | Google Meet        |
| E2           | Mestre em Engenharia de Tráfego   | Técnico                 | +20 anos                 | 14/01/2021         | 01:47             | Google Meet        |
| E3           | Mestre em regulação semafórica e Doutor em otimização de sistemas de grande porte | Político-Administrativo | +20 anos                 | 06/01/2021         | 01:09             | Google Meet        |
| E4           | Mestre em Engenharia de Tráfego   | Técnico                 | +20 anos                 | 22/01/2021         | 01:23             | Google Meet        |

Fonte: Elaborado pela autora.

Foram realizadas entrevistas com profissionais de perfis diferentes, buscando diferentes percepções e potencializando com isso o resultado a ser apresentado. As entrevistas foram realizadas remotamente utilizando-se de aplicativo para comunicação à distância, não sendo para isso necessário definir o local das mesmas. As entrevistas foram gravadas e posteriormente transcritas em texto digitado, o que permitiu a análise de seu conteúdo por meio da codificação e da categorização, conforme respaldado por Gibbs (2009).

### 3.2.2.1 ROTEIRO DE ENTREVISTAS

O roteiro de entrevistas foi elaborado com o objetivo de obter informações e percepções de profissionais que possuem profundo conhecimento do tema em questão. Além disso, existiu interesse em entender qual o posicionamento dos entrevistados frente a novas tecnologias e a possibilidade de implementação das mesmas na cidade de São Paulo. No Apêndice II encontram-se o roteiro de entrevistas, assim como as fontes de origem dos constructos teóricos utilizados para estruturar o roteiro, embasados nos dados relativos à implementação em São Paulo, nas soluções tecnológicas disponíveis para controle semafórico, assim como exemplos de aplicação em algumas cidades do Brasil e do mundo. Esses dados são relevantes para a elaboração das questões, na medida em que a implantação em São Paulo pode ser analisada e comparada com outras experiências de uso de semáforos inteligentes.

### 3.2.2.2 PRÉ-TESTE DAS ENTREVISTAS

Com o objetivo de validar o instrumento de coleta de dados e prever problemas e/ou dúvidas que poderão surgir durante a aplicação do questionário, foi realizado um pré-teste possibilitando avaliar a aceitabilidade, clareza e entendimento do questionário.

“As ideias expressas por um sujeito numa entrevista, *verbi gratia*, imediatamente analisadas e interpretadas, podem recomendar novos encontros com outras pessoas ou a mesma, para explorar aprofundadamente o mesmo assunto ou outros tópicos que se consideram importantes para o esclarecimento do problema inicial que originou o estudo” (Triviños, 2008, p.137).

Nesse sentido, no dia 4 de junho de 2020, foi realizado um pré-teste da entrevista com o entrevistado 4 (E4), Mestre em Engenharia de Tráfego, com mais de vinte anos de experiência na área, quando foi aplicado o roteiro contido no Apêndice III. Para permitir uma melhor análise da entrevista e entender a limitação do instrumento, a mesma foi gravada e, após sua escuta, foi possível validar o instrumento com as contribuições e sugestões feitas pelo entrevistado, assim como pelo entendimento realizado no decorrer da entrevista e após a avaliação da mesma. A partir de então, o resultado dessa análise propiciou as seguintes alterações no Roteiro Original:

- a) Houve ajustes na ordenação das questões, fazendo com que as informações sobre Novos Estudos fossem seguidas pela Avaliação sobre a revitalização do sistema. No entanto, as questões foram mantidas.
- b) Foi identificada a necessidade de incluir um novo conjunto de questões para abordar a situação atual do controle semafórico em São Paulo, focando em novas ações, planos e tecnologias.
- c) A questão sobre a colocação feita pelo Scaringella (2001) e a opinião dos entrevistados, foi retirada do roteiro.

Com isso, o roteiro revisado, considerando essas alterações, se encontra disponível no Apêndice IV, com a identificação – Roteiro de Entrevistas Revisado. Este novo roteiro foi aplicado aos entrevistados subsequentes, assim como ao entrevistado que o Pré-Teste foi submetido.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS

Optou-se por utilizar o tratamento e análise de dados por meio da análise de conteúdo, uma vez que ela atende à análise das comunicações, perpassando por diversas fontes de dados: documentos, notícias, relatórios, entrevistas, revistas, entre outros (Triviños, 2008).

De acordo com Bardin (2011), a análise de conteúdo é:

"um conjunto de técnicas de análise das comunicações, visando a obter, por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores (quantitativos ou não) que permitam a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) das mensagens" (Bardin, 2016, p. 48).

Neste sentido, segundo Bardin (2016) a organização da análise se dará em torno de três polos: pré-análise, exploração do material e, por fim, o tratamento dos dados e interpretações, conforme apresentados na sequência.

### 3.3.1 PRÉ-ANÁLISE

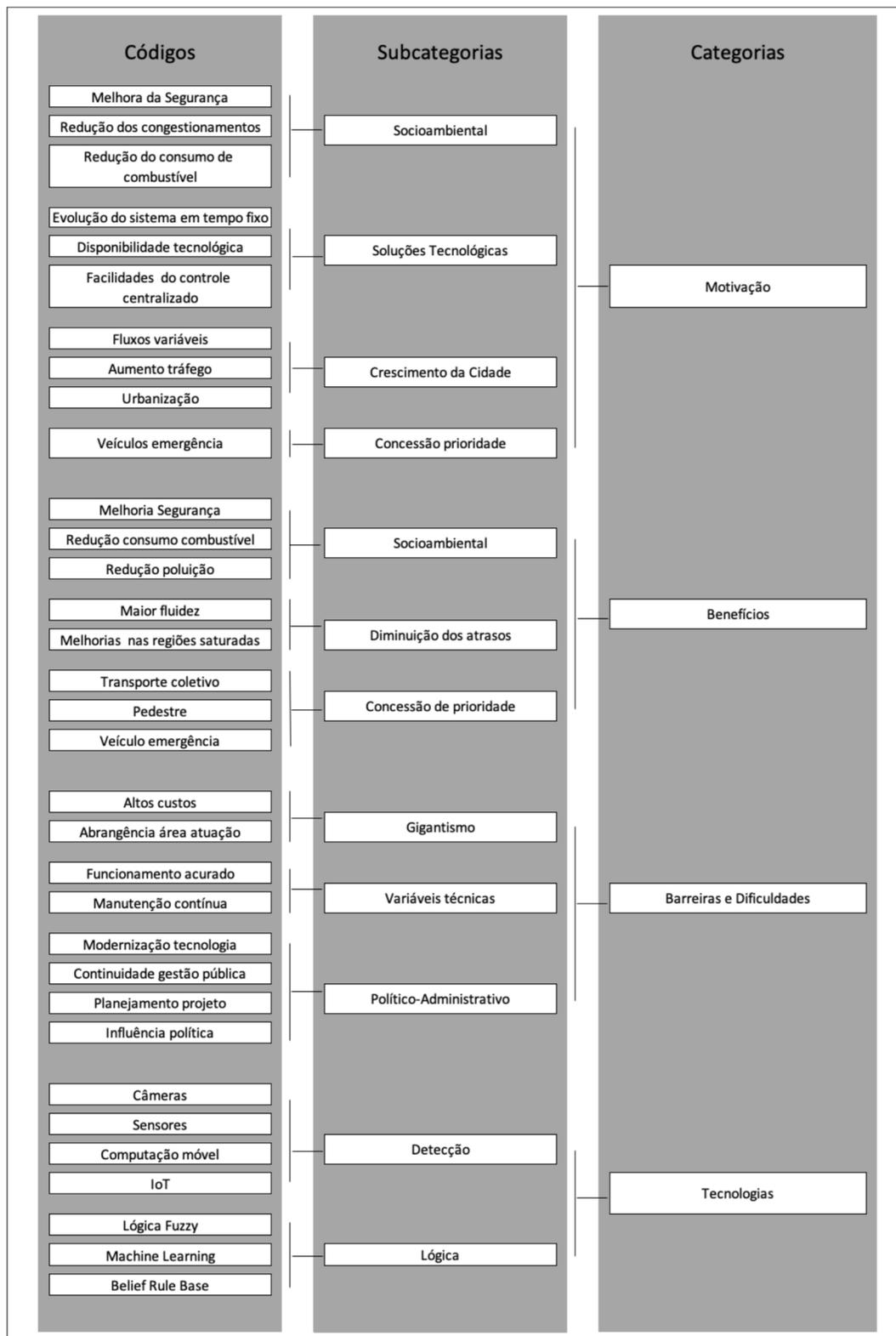
Segundo a análise de conteúdo proposta por Bardin, inicialmente foi realizada a leitura flutuante dos documentos técnicos (boletins e normas), assim como da transcrição das entrevistas realizadas, para o conhecimento dos textos e para obter as primeiras impressões e orientações sobre o conteúdo. Os documentos foram escolhidos *a posteriori*, em consonância com a definição do objetivo da análise. O corpus, conjunto dos documentos tidos em conta para serem submetidos aos procedimentos analíticos (Bardin, 2016), foi composto de documentos técnicos e do conteúdo das entrevistas. No caso, todas as entrevistas foram analisadas e consideradas, uma vez que elas tiveram conteúdos pertinentes e, em algumas situações, complementares, por terem sido realizados com profissionais de diferentes perfis técnicos e político-administrativo.

### 3.3.2 EXPLORAÇÃO DO MATERIAL

Pela característica da pesquisa e dos dados coletados, foi utilizada a codificação dedutiva oriunda da literatura, onde identificaram-se categorias, aspectos e características que foram utilizadas para a codificação dos dados. A codificação corresponde a uma transformação dos dados brutos do texto, permitindo atingir uma representação do conteúdo ou da sua expressão; suscetível de esclarecer o analista acerca das características do texto (Bardin, 2016). E que, segundo Holsti (1969, p.94): "A codificação é o processo

pelo qual os dados brutos são transformados sistematicamente e agregados em unidades, as quais permitem uma descrição exata das características pertinentes do conteúdo”.

Para a codificação desta pesquisa foram utilizadas as unidades de registro temática/categorial, se constituindo de frases, parágrafos e termos empregados pelos participantes. Por se utilizar de entrevistas, o tema é geralmente utilizado para estudar motivações de opiniões, de atitudes, de valores, de crenças, de tendências etc. Segundo Bardin (2016), as análises das respostas obtidas por meio das entrevistas, frequentemente, são realizadas com base no tema estudado. Os códigos, categorias e subcategorias estão apresentados na Figura 14.



**Figura 14.** Códigos, Categorias e Subcategorias.  
 Fonte: Elaborado pela autora.

Pela análise da Figura 14, observam-se os códigos deduzidos da literatura que, com a aplicação do processo de codificação, sofreram modificações pontuais na nomenclatura, bem como na criação de novos códigos. Esse processo resultou em 33 códigos que foram agrupados e organizados similarmente em subcategorias e estas, em categorias. As categorias resultantes desse processo foram: as motivações para o uso de semáforos inteligentes, os benefícios do seu uso, as barreiras e dificuldades oriundas da implementação da tecnologia semafórica em tempo real e, finalmente, as tecnologias estudadas. Esse agrupamento de códigos permitiu visualizar os posicionamentos encontrados na literatura e no conteúdo das entrevistas que suportam a análise de um projeto de implementação dos semáforos inteligentes, bem como as tecnologias atualmente disponíveis para uso nos controles semafóricos.

### 3.3.3 TRATAMENTO DOS DADOS E INTERPRETAÇÕES

Com a codificação realizada, onde foram identificados trechos dos materiais analisados que exemplificavam a mesma ideia (Gibbs, 2009), foram identificados trechos da transcrição das entrevistas, que à medida que as perguntas iam sendo analisadas, foram associados a códigos já existentes ou códigos novos emergiram das respostas concedidas. Realizada a codificação, foi feita a categorização, reunindo os códigos sob um título genérico, agrupando em função das características comuns entre eles (Bardin, 2016).

Para a codificação e categorização das entrevistas, foi utilizado o *software* ATLAS.ti 9, pela sua característica de auxiliar na análise qualitativa de um trabalho científico, à medida que permite codificar, analisar e identificar relações, muitas vezes difíceis de realizar com a simples leitura de um texto (dados disponíveis no site da empresa fabricante do aplicativo). Para tanto, foram adotadas algumas ações utilizando-se do ATLAS.ti, quais sejam: a. criação de códigos; b. carregamento do conteúdo da transcrição das entrevistas como documentos; c. criação das categorias como grupo de códigos; d. associação dos trechos das entrevistas com os códigos anteriormente criados. A partir da análise e associação dos códigos, foi utilizada a opção do *software*

“Gerenciamento de Citação”, pelo qual, puderam-se identificar 151 citações, como representado pela Figura 15.

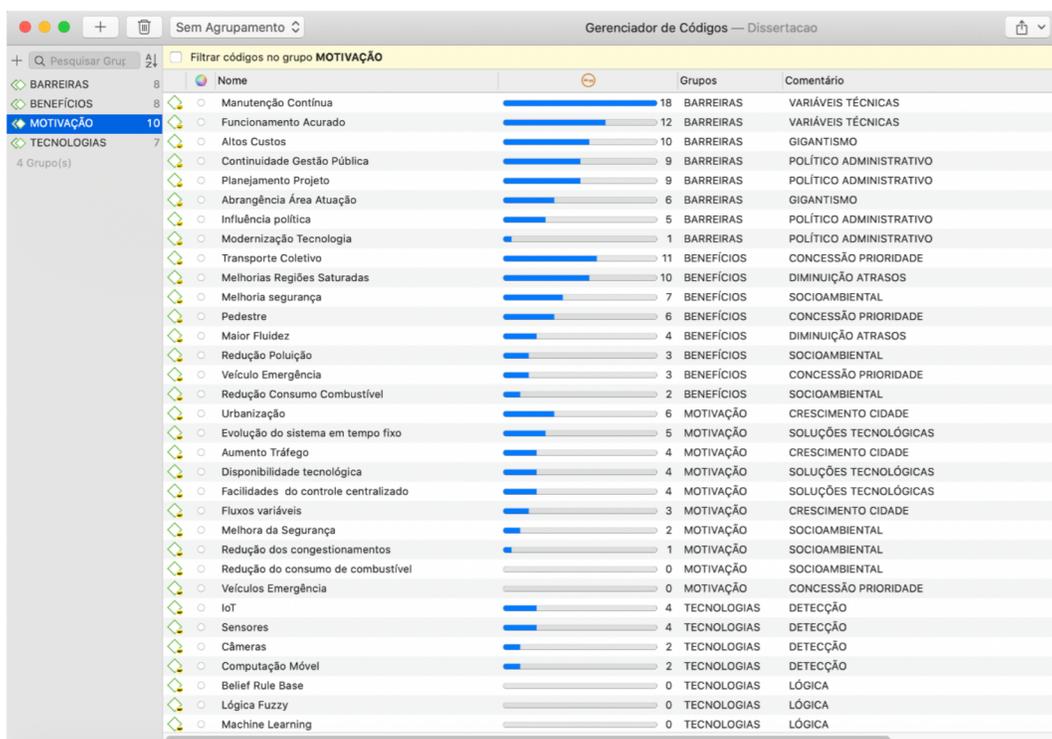
| #  | Referência | Nome | Conteúdo de Texto   | Códigos  | Início | Fim |
|----|------------|------|---|--|--------|-----|
| 21 | 4-31       | 102  | a centralização já é um grande negócio para a gestão do trânsito e... | Facilidades do controle centralizado                   | 102    | 102 |
| 6  | 4-12       | 65   | A segurança é tanto para o motorista, quanto para o pedestre.         | Melhoria segurança                                     | 65     | 65  |
| 10 | 4-36       | 106  | acidente, aumenta poluição, principalmente poluição, pq em SP qu...   | Redução Poluição                                       | 106    | 106 |
| 4  | 4-34       | 114  | Agora, em SP, a demanda de veículos é muito maior do que a ofert...   | Abrangência Área Atuação                               | 114    | 114 |
| 0  | 4-10       | 63   | As ociosidades são diminuídas, reduz espera do pedestre, não ger...   | Melhoria segurança                                     | 63     | 63  |
| 2  | 4-29       | 102  | centralização é uma coisa barata e que dá um retorno muito grande,    | Facilidades do controle centralizado                   | 102    | 102 |
| 0  | 4-1        | 10   | Com a evolução natural da tecnologia e tb a necessidade de se ex...   | Disponibilidade tecnológica, Evolução do sistema em... | 10     | 10  |
| 9  | 4-6        | 62   | conseguiu resolver problemas em lugares que dava como caso per...     | Melhorias Regiões Saturadas                            | 62     | 62  |
| 4  | 4-15       | 74   | ele deve ser aplicado em sistemas saturados                           | Melhorias Regiões Saturadas                            | 74     | 74  |
| 5  | 4-14       | 74   | Ele não é barato, por vários motivos desde o sw que tem que com...    | Altos Custos   | 74     | 74  |
| 4  | 4-19       | 83   | Então vc tem que o primeiro sistema de manutenção dos detectores.     | Manutenção Contínua                                    | 83     | 83  |
| 3  | 4-17       | 82   | era preciso uma rede enorme, custosa, uma rede de comunicação...      | Abrangência Área Atuação, Altos Custos                 | 82     | 82  |
| 12 | 4-2        | 10   | Era uma evolução para o sistema de tempo fixo que tinha aqui e q...   | Evolução do sistema em tempo fixo                      | 10     | 10  |
| 5  | 4-18       | 82   | Este é o primeiro ponto que a infraestrutura era gigantesca.          | Abrangência Área Atuação                               | 82     | 82  |
| 4  | 4-37       | 151  | Eu não sei se vale a pena, primeiro porque os veículos de emergên...  | Veículo Emergência                                     | 151    | 151 |
| 0  | 4-38       | 17   | Expansão do controle centralizado                                     | Facilidades do controle centralizado                   | 17     | 17  |
| 4  | 4-21       | 86   | Fora isso, que é a questão técnica, teve a questão administrativa...  | Planejamento Projeto                                   | 86     | 86  |
| 15 | 4-11       | 64   | Foram essas duas vantagens, a vantagem da redução de atrasos é...     | Redução Consumo Combustível, Redução Poluição          | 64     | 64  |
| 2  | 4-22       | 86   | ganho de escala. Por exemplo, eles queriam fazer todos os laços d...  | Planejamento Projeto                                   | 86     | 86  |
| 7  | 4-33       | 110  | laços intrusivos são mais precisos, t                                 | Sensores   | 110    | 110 |
| 10 | 4-5        | 62   | Mkt era voltado para a fluidez, iria ter menos perdas, menos atras... | Maior Fluidez  | 62     | 62  |
| 1  | 4-25       | 92   | Não foram associados contratos de manutenção aos contratos da...      | Manutenção Contínua                                    | 92     | 92  |
| 6  | 4-4        | 11   | O sistema em tempo real é muito mais eficiente e ele é muito reco...  | Disponibilidade tecnológica                            | 11     | 11  |
| 9  | 4-32       | 106  | O tempo fixo sem ter alguém regulando acaba sendo um expone...        | Manutenção Contínua                                    | 106    | 106 |
| 2  | 4-24       | 86   | Obviamente que o sistema tinha que ser administrativamente falan...   | Abrangência Área Atuação                               | 86     | 86  |
| 0  | 4-26       | 92   | Os controladores eram importados, a CET não tinha peças, então t...   | Planejamento Projeto                                   | 92     | 92  |
| 1  | 4-35       | 137  | Para se ter uma ideia, quando foi se implantar os laços da consola... | Transporte Coletivo                                    | 137    | 137 |
| 1  | 4-16       | 62   | Primeiro o gigantismo do negócio, muitos cruzamentos requerem...      | Abrangência Área Atuação                               | 62     | 62  |
| 3  | 4-23       | 86   | Quer dizer o projeto não teve uma boa gestão administrativa.          | Planejamento Projeto                                   | 86     | 86  |
| 4  | 4-9        | 63   | Se não bastasse isso, ele deu um grande ganho na parte da segur...    | Melhoria segurança                                     | 63     | 63  |
| 6  | 4-3        | 11   | SP já estava vivendo um período de saturação do trânsito              | Aumento Tráfego  | 10     | 10  |
| 3  | 4-3        | 11   | tempo fixo tem muitas limitações que não dão conta se você tem...     | Evolução do sistema em tempo fixo                      | 11     | 11  |
| 0  | 4-28       | 101  | vamos pegar os corredores saturados, ou os que não são tão satu...    | Melhorias Regiões Saturadas                            | 101    | 101 |
| 0  | 4-20       | 85   | voltando ao gigantismo, depois tem a manutenção                       | Manutenção Contínua                                    | 85     | 85  |

Resultado: 151 de 151 Citação(ões)

**Figura 15.** Gerenciador de citação.

Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos do Atlas.ti.

A Figura 15, ilustra na coluna “Conteúdo do texto” trechos das entrevistas que evidenciam a fala dos entrevistados. Esses trechos foram codificados e os respectivos códigos associados se vêm representados na coluna “Códigos”. Adicionalmente, foi realizada a análise de frequência dos códigos, contemplando suas respectivas categorias e subcategorias, por meio da opção “Gerenciador de Códigos”, conforme representação da Figura 16.



**Figura 16.** Gerenciador de códigos.

Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos do Atlas.ti.

Pela análise da Figura 16, observam-se as frequências com que os códigos foram mencionados nas falas dos entrevistados. Por se tratar de uma visão extraída diretamente do ATLAS.ti, as colunas têm como título as nomenclaturas adotadas no *software*, sendo necessário para tanto correlacioná-las com os rótulos utilizados na análise de conteúdo, quais sejam: os códigos estão representados pela coluna de título “Nome”; sucedidas da frequência mostrada por meio de uma barra e sua respectiva quantidade; as subcategorias estão rotuladas como “Grupos” e, por fim, as categorias como “Comentários”.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

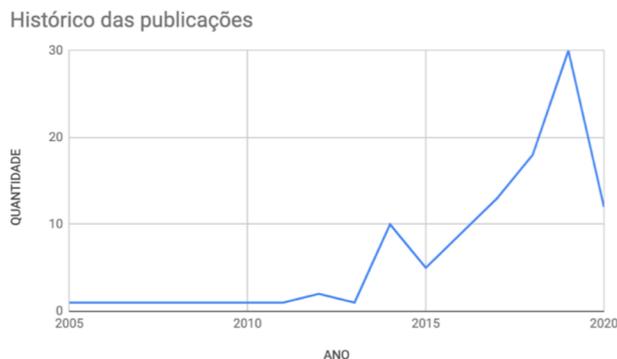
Este capítulo tem por objetivo descrever e discutir os resultados desta pesquisa encontrados por meio da análise dos dados. Eles estão relacionados à implantação de semáforos inteligentes e às soluções identificadas ao redor do mundo, contribuindo assim para a exposição do estado da arte a respeito desta tecnologia. Assim, o capítulo está dividido em quatro seções, sendo a primeira seção referente ao resultado da RSL. Na segunda seção serão apresentados dados relativos à implantação dos semáforos inteligentes na cidade de São Paulo na década de 1990. A seção seguinte destina-se à análise de conteúdo das entrevistas e documentos relacionados à implantação dos semáforos inteligentes, ponderados com o referencial teórico e o resultado da RSL. A última seção contém os aprendizados e as sugestões de soluções que poderão estar alinhadas com as necessidades e as demandas relacionadas às tecnologias semafóricas da cidade de São Paulo.

### 4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Para identificar as principais soluções de controles semafóricos inteligentes foi realizada uma RSL sobre o estado da arte dessas tecnologias desenvolvidas para atender a demanda variável de tráfego nas cidades. Segundo Kitchenham e Charters (2007), uma RSL é um estudo secundário com um processo de pesquisa metodologicamente bem definido, cujo objetivo é encontrar o maior número possível de estudos primários relacionados com a questão de pesquisa. As razões para se adotar a RSL estão respaldadas por Randolph (2009): delimitar o problema de pesquisa; buscar novas linhas de investigação; identificar recomendações para futuras pesquisas e buscar fundamentação teórica. Kitchenham e Charters (2007) complementa essa lista afirmando que as revisões sistemáticas podem ser realizadas para resumir as evidências empíricas existentes, suportar ou refutar uma hipótese ou até mesmo auxiliar na geração de novas hipóteses, fatores aplicáveis a este estudo que busca a proposição de soluções de controle semafóricos para São Paulo. A literatura se refere às tecnologias de detecção do tráfego em tempo real e aos algoritmos utilizados para cálculo das melhores temporizações semafóricas, bem como os benefícios e motivações gerados por essas implementações.

#### 4.1.1 ANÁLISE DESCRITIVA

De acordo com a tendência histórica das publicações encontradas na base de dados *SCOPUS*, a pesquisa relacionada a semáforos inteligentes não foi ativa até meados de 2014, como representado na Figura 17.

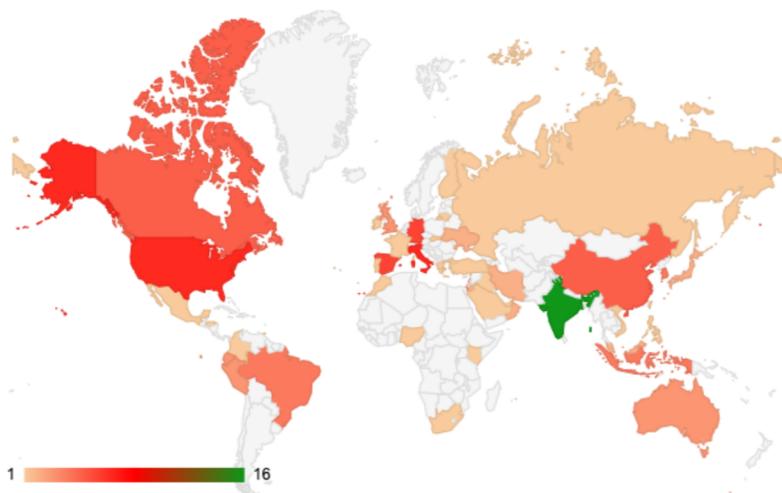


**Figura 17.** Ocorrência de estudos por ano.

Fonte: Cavalheiro, Quaresma e Conti (2020).

Observando a Figura 17, pode-se notar que o período entre 2017 e 2020 representa 70% das publicações identificadas, podendo ser atribuído ao desenvolvimento tecnológico no setor de controle de tráfego, assim como pelos semáforos inteligentes serem vistos como uma alternativa para mitigar o impacto dos congestionamentos e a crise de mobilidade (Palsa, Vokorokos, Chovancova & Chovanec, 2019). Vale ressaltar que as publicações de 2020, consideradas no estudo, referem-se a 9 meses, em função da data em que o mesmo foi realizado.

Quanto aos padrões geográficos, apesar das publicações se fazerem presentes em todo o mundo, os estudos foram predominantemente elaborados no continente asiático (43%), conforme apresentado na Figura 18.



**Figura 18.** Distribuição dos estudos por países.

Fonte: Cavalheiro, Quaresma e Conti (2020).

Dos 104 estudos inicialmente selecionados, a Índia se destaca com 16 artigos, seguida pelos Estados Unidos e Itália, ambos com 7 estudos cada. Segundo Kataria e Rani (2019), o trânsito na Índia é caótico e não baseado em faixas de tráfego, agravando ainda mais o congestionamento do tráfego, resultando em mais desperdício de recursos ambientais, sociais e econômicos. Com isso, é possível inferir que a Índia realize mais estudos buscando alternativas para mitigar o impacto gerado pelos congestionamentos.

#### 4.1.2 ARTIGOS SELECIONADOS

A partir dos artigos resultantes da pesquisa (104) foram realizadas a análise e leitura dos títulos e resumos, bem como do impacto das fontes de pesquisa. Na sequência foi executada a leitura integral dos artigos e a aplicação dos critérios de Inclusão e Exclusão. Após a conclusão destes dois ciclos de análise, restaram 22 artigos, os quais foram categorizados por temas e analisados mais profundamente. As características dos 22 artigos, identificados nesta revisão e apresentados na Tabela 10, reiteram a premissa de que esse tema está sendo analisado como uma alternativa à crise de mobilidade urbana desencadeada ao redor do mundo, e mais especificamente nos grandes centros urbanos.

**Tabela 10**

Identificação dos artigos selecionados

| Autores  | Título  | Ano Publicação |
|--|---|----------------|
| Serrano Á., Conde C., Rodríguez-Aragón L.J., Montes R., Cabello E.         | Computer vision application: Real time smart traffic light  | 2005           |
| Sangster N., Persad P., Duncan D.  | Investigating the use of fuzzy logic for smart traffic lights at an overpass  | 2009           |
| Kanungo A., Sharma A., Singla C.   | Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing                               | 2014           |
| Miz V., Hahanov V.   | Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things | 2014           |
| Munst W., Dannheim C., Mäder M., Gay N., Malnar B., Al-Mamun M., Icking C. | Virtual traffic lights: Managing intersections in the cloud   | 2015           |
| Ghazal B., Elkhatib K., Chahine K., Kherfan M.                             | Smart traffic light control system  | 2016           |
| Lin Y.-Q., Li M., Chen X.-C., Fu Y.-G., Chi Z.-W.                          | A Belief Rule Base Approach for Smart Traffic Lights  | 2016           |
| Nor R.F.A.M., Zaman F.H.K., Mubdi S.                                       | Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN   | 2017           |
| Bui K.-H.N., Jung J.E., Camacho D.   | Game theoretic approach on Real-time decision making for IoT-based traffic light control                            | 2017           |
| Ameddah M.A., Das B., Almhana J.   | Priority based Algorithm for Traffic Intersections Streaming Using VANET  | 2018           |
| Kataria P., Rani A.  | Real-Time Traffic Light Management System with Manual Control   | 2019           |
| Al-qutwani M., Wang X.   | Smart traffic lights over vehicular named data networking   | 2019           |
| Nguyen-Ly T.T., Tran L., Huynh T.V.  | Low-cost, high-efficiency hardware implementation of smart traffic light system                                     | 2019           |
| Palsa J., Vokorokos L., Chovancova E., Chovanec M.                         | Smart cities and the importance of smart traffic lights   | 2019           |
| El Hassak I., Addaim A.  | Proposed solutions for smart traffic lights using machine learning and internet of thing                            | 2019           |
| Razavi M., Hamidkhani M., Sadeghi R.                                       | Smart Traffic Light Scheduling in Smart City Using Image and Video Processing                                       | 2019           |
| Frank A., Khamis Al Aamri Y.S., Zayegh A.                                  | IoT based smart traffic density control using image processing  | 2019           |
| Hartanti D., Aziza R.N., Siswipraptini P.C.                                | Optimization of smart traffic lights to prevent traffic congestion using fuzzy logic                                | 2019           |
| Natafqi M.B., Osman M., Haidar A.S., Hamandi L.                            | Smart Traffic Light System Using Machine Learning   | 2019           |
| Alkhatib A.A.A., Sawalha T.  | Techniques for road traffic optimization: An overview   | 2020           |

|   |   |      |
|---|---|------|
| Manasi P.S., Nishitha N., Pratyusha V., Ramesh T.K.                     | Smart Traffic Light Signaling Strategy  | 2020 |
| Alaidi A.H.M., Aljazaery I.A., AlRikabi H.T.S., Mahmood I.N., Abed F.T. | Design and implementation of a smart traffic light management system controlled wirelessly by arduino | 2020 |

Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio da revisão sistemática de literatura foram identificados vários campos de estudo e tecnologias passíveis de implementação que utilizam diferentes componentes na composição da solução e envolvem diferentes atores, buscando atender às necessidades prementes das regiões urbanas. Foram abordados estudos que buscam aumentar a segurança dos pedestres, identificando seu interesse para cruzar uma via, diminuindo o tempo de espera; controladores semafóricos que agilizam a passagem de veículos prioritários, cientes da importância em agilizar seu deslocamento; sensores que atendem à demanda de motocicletas, tidas como principal meio de transporte em algumas cidades; soluções que utilizam a comunicação móvel, seja entre veículos, infraestrutura ou rede, viabilizando a implantação de semáforos virtuais em substituição aos semáforos físicos. Os resultados da RSL aparecem ao longo das discussões, uma vez que eles foram utilizados no item de análise de conteúdo para confrontar com os resultados da transcrição das entrevistas e dos documentos.

#### 4.2 IMPLANTAÇÃO DOS SEMÁFOROS INTELIGENTES NA CIDADE DE SÃO PAULO

A cidade de São Paulo passou no final da década de 1990 por um complexo projeto denominado CTA - Centrais de Tráfego em Área, que serviu como base para a implementação de um novo tipo de controle semafórico: o sistema de controle em tempo real, também chamado de semáforos inteligentes. Neste projeto, foi implementado controle em tempo real em cerca de 1500 dos 4000 cruzamentos que a cidade possuía à época. Este novo sistema de controle surgiu para substituir o sistema anterior chamado SEMCO – Semáforos Coordenados por Computador, implantado na década de 1980, responsável pela operação centralizada de 470 cruzamentos em tempo fixo. No entanto, a experiência com a centralização em uma única CTA não se mostrou eficiente para os

serviços de operação e manutenção. Naquele sistema, todos os semáforos, independente da região da cidade em que estavam localizados e das diferentes características que tinham entre si, eram operados por uma única Central de Tráfego. Baseado nesta experiência, para o novo projeto foram construídas 5 CTAs, cada qual responsável pelos semáforos das regiões que elas administravam, a saber: CTA1- Centro Expandido, CTA2- Oeste e Norte, CTA3- Leste, CTA4- Sudeste e CTA5- Sul. Os centros de controle foram instalados próximo ao centro geográfico da área que ele controlava, evitando com isso maiores custos para a transmissão de dados e dos serviços de operação e manutenção, de acordo com o documento D5 (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005).

#### 4.2.1 ESCOLHA DA SOLUÇÃO

Nas definições do projeto para a escolha da solução tecnológica a ser implementada, não havia indicação de fornecedor, porém uma diretriz obrigatória: de que a solução deveria ser em tempo real. Este aspecto é evidenciado pelo que disse o entrevistado E1:

“Em termos de fabricante ou tecnologia, não tinha nenhuma diretriz específica. A especificação que foi escrita para fazer a licitação de semáforos inteligentes era bastante genérica. A única restrição/condição era a definição do que se entendia por semáforos inteligentes, um sistema que respondesse em tempo real ao tráfego”.

Os critérios utilizados na escolha da solução também foram apontados por E4: “O objeto da licitação era um sistema de controle em tempo real, então a empresa que ganhasse, que tivesse o melhor preço, tinha que apresentar certificados técnicos de que ela tinha um sistema que operava em tempo real”. Foram analisados os sistemas disponíveis na época, E4 complementa: “Foi uma concorrência internacional. Era inevitável porque era uma tecnologia que não existia aqui”. Como resultado da licitação foram adotadas duas soluções de controles semaforicos em tempo real: a inglesa *SCOOT* (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) e a espanhola *ITACA* (*Intelligent Traffic Adaptive Control Area*), com implantações em três e duas centrais de tráfego, respectivamente.

#### 4.2.2 INVESTIMENTO

Conforme o documento D5, a análise benefício/custo foi o critério definido para a escolha dos 1500 cruzamentos onde foram instaladas a solução de controle em tempo real. Somente seria implementada se o índice benefício/custo ultrapassasse o valor quatro, adotado como patamar mínimo para recomendação da nova tecnologia (Vilanova, Cucci & Fernandes, 2005). Como se tratava de um alto investimento, foi feito um estudo para comprovar a relação benefício/custo do projeto, como relata E1:

“O estudo, que durou um ano, para saber em que locais, em que cruzamentos, valeria a pena implantar esse sistema, porque implantar onde tiver pouco tráfego, o benefício é pequeno. Esse estudo usou simuladores para avaliar se justificava, adotando como premissa que para valer a pena a implantação, a relação benefício/ custo deveria ser 4/1. Apenas em lugares onde essa relação fosse maior que o índice 4 implantaria o sistema”.

“O tempo real tem que procurar chegar num nível de benefício/custo razoável, porque ele é um sistema caríssimo. Tem que deixar passar mais carros e provar isso”, complementa E2. Dependendo da verba disponibilizada, a quantidade de cruzamentos poderia ser ainda mais reduzida, utilizando por exemplo critério 6/1, explica E1.

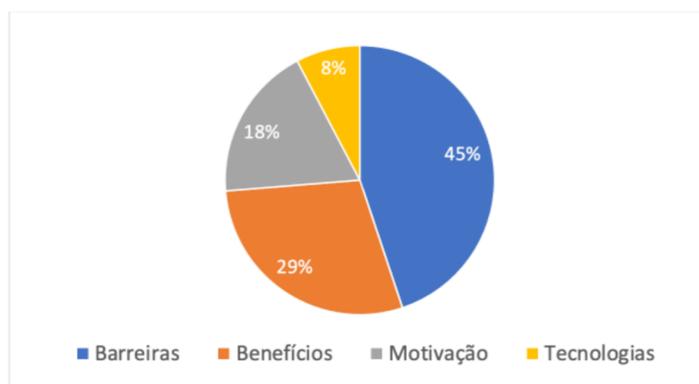
#### 4.2.3 DESUSO

Em que pese o sistema ter se mostrado bastante eficiente e ter trazido resultados relevantes em termos de fluidez e segurança na sua implementação em São Paulo no final da década de 1990, ele entrou em desuso no início da década de 2010. Depreende-se das entrevistas que os impactos ocorridos com a infraestrutura e a ausência da devida manutenção, desencadearam a impossibilidade de operação do sistema e seu consequente desuso.

### 4.3 ANÁLISE DE CONTEÚDO

#### 4.3.1 RELEVÂNCIA DOS TEMAS PARA OS ENTREVISTADOS

Com o objetivo de identificar a relevância que os entrevistados deram para cada um dos temas (categorias), foi realizada uma análise da frequência com que os mesmos apareceram nas falas dos participantes. Os resultados são apresentados na Figura 19, sendo o tema Barreiras aquele mais citado, com 45% das ocorrências, seguido por Benefícios (29%), Motivação (18%) e Tecnologia (8%).



**Figura 19.** Frequência dos temas nas entrevistas.

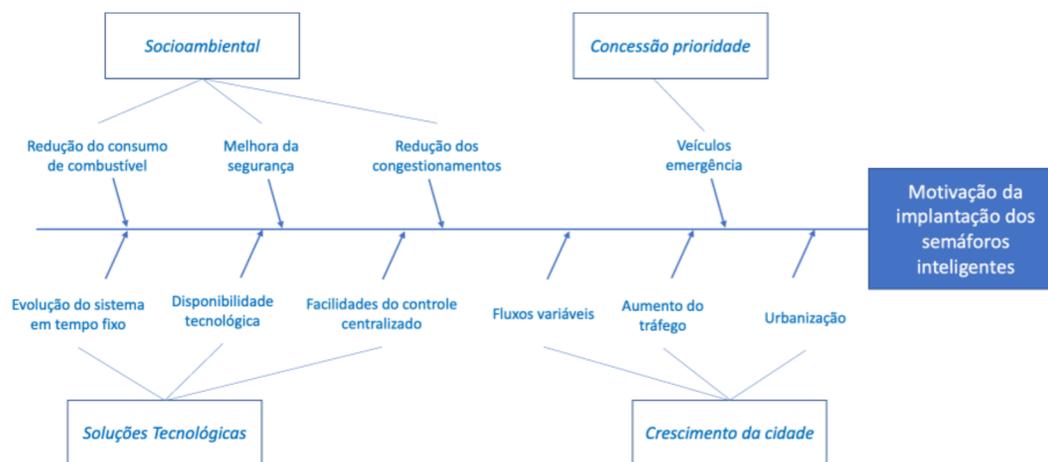
Fonte: Elaborado pela autora.

Na sequência, será apresentada a análise de conteúdo da RSL, bem como das entrevistas e documentos, agrupando os códigos identificados por tema (categoria) e subcategoria.

#### 4.3.2 MOTIVAÇÃO

A motivação da escolha dos semáforos inteligentes como uma alternativa para diminuição do congestionamento e dos problemas causados por eles se fez presente nos artigos identificados na RSL, assim como nas entrevistas e nos documentos analisados.

A Figura 20, representa as subcategorias, assim com os respectivos códigos agrupados que retratam as Motivações que serão detalhados nesta seção.



**Figura 20.** Agrupamento de códigos e subcategorias de Motivação.

Fonte: Elaborado pela autora

O tema motivação recebeu 29 citações nos conteúdos das entrevistas, sendo agrupadas nas codificações demonstradas na Figura 21.

| Código                               | Frequência | Categoria | Subcategoria          |
|--------------------------------------|------------|-----------|-----------------------|
| Urbanização                          | 6          | MOTIVAÇÃO | CRESCIMENTO CIDADE    |
| Evolução do sistema em tempo fixo    | 5          | MOTIVAÇÃO | SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS |
| Aumento Tráfego                      | 4          | MOTIVAÇÃO | CRESCIMENTO CIDADE    |
| Disponibilidade tecnológica          | 4          | MOTIVAÇÃO | SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS |
| Facilidades do controle centralizado | 4          | MOTIVAÇÃO | SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS |
| Fluxos variáveis                     | 3          | MOTIVAÇÃO | CRESCIMENTO CIDADE    |
| Melhora da Segurança                 | 2          | MOTIVAÇÃO | SOCIOAMBIENTAL        |
| Redução dos congestionamentos        | 1          | MOTIVAÇÃO | SOCIOAMBIENTAL        |
| Redução do consumo de combustível    | 0          | MOTIVAÇÃO | SOCIOAMBIENTAL        |
| Veículos Emergência                  | 0          | MOTIVAÇÃO | CONCESSÃO PRIORIDADE  |
| <b>Resultado: 10 de 33 Código(s)</b> |            |           |                       |

**Figura 21.** Frequência das citações do tema Motivação.

Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos do Atlas.ti.

Conforme pode ser observado na Figura 21, o código que recebeu mais citações dentro desta categoria foi Urbanização, seguido por Evolução do sistema em tempo fixo, além dos demais códigos. Os participantes citaram com maior frequência as motivações

relacionadas às subcategorias de crescimento da cidade e de soluções tecnológicas, apesar da literatura enfatizar as questões socioambientais.

#### 4.3.2.1 CRESCIMENTO DA CIDADE

##### 4.3.2.1.1 Urbanização

O acelerado e desordenado processo de urbanização brasileira afetou de maneira decisiva o padrão de mobilidade da população, priorizando o transporte individual (IPEA, 2010). Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019) destacam que a população crescente e o aumento de veículos levam aos principais desafios na vida urbana. Enquanto o número de veículos está aumentando em um ritmo acelerado, a infraestrutura da cidade não está sendo capaz de acompanhar esse crescimento (Kanungo, Sharma & Singla, 2014). Segundo Alkhatib e Sawalha (2020) a necessidade de se criar nova infraestrutura nem sempre é a solução mais adequada, em função do custo. Soluções parciais vem sendo ofertadas por meio da construção e reabilitação de estradas, implementação de viadutos e anéis viários, no entanto, o problema de tráfego é muito complicado devido ao envolvimento de diversos parâmetros (Ghazal, Elkhatib, Chahine & Kherfan, 2016). Scaringella (2001), concorda com este aspecto, na medida em que propõe um modelo com vários atores, entre eles, políticos, tecnológicos e administrativos, agregando a necessidade do uso de engenharia de tráfego, tecnologia e informações.

O aspecto é reiterado pelas colocações de E3: “O problema não é resolvido somente pela tecnologia ou por obras civis. É uma questão de planejamento urbano e da prioridade do transporte público coletivo. A tecnologia vem ajudando e continuará ajudando”. A transformação no Brasil não foi acompanhada do devido planejamento, diferentemente do ocorrido nos países desenvolvidos, onde essa evolução foi acompanhada por um planejamento urbano adequado (Vandermotten, 1985). E3 concorda com esta colocação afirmando que: “Até os anos 1960/1970 o Brasil era um Brasil rural. Hoje são 12 milhões de pessoas na capital de São Paulo que interagem”. Segundo ele, o planejamento do uso do solo realizado de maneira inteligente, propicia uma menor necessidade de deslocamentos, à medida que disponibiliza infraestrutura e equipamentos urbanos mais próximos, evitando com isso viagens desnecessárias.

#### 4.3.2.1.2 Fluxos variáveis

Os fluxos variáveis, identificados na literatura e suportados pelos dados coletados, são limitações dos sistemas convencionais e dos sistemas em tempo fixo. Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016) afirmam que estes sistemas não conseguem lidar com a variabilidade gerada por eventos inesperados, acidentes, obras rodoviárias e carros quebrados que pioram o congestionamento do tráfego, por estarem configurados com informações pré-estabelecidas, baseada em dados históricos.

Hartanti, Aziza e Siswipraptini (2019, p.320) afirmam que “os semáforos não têm sido capazes de mostrar a temporização correta de acordo com as condições de tráfego existentes. Configurações dos semáforos sem considerar a demanda em tempo real, não são suficientes para lidar com situações inesperadas”.

A necessidade de implantação de um sistema que se adapte às variações do tráfego dinamicamente e que atualiza as temporizações semaforicas em conformidade com eventos inesperados também são destacados por Natafqi, Osman, Haidar e Hamandi L (2019); Munst et al. (2015).

O entrevistado E2 mostrou-se alinhado com este aspecto, afirmando que:

“Sem os semáforos em tempo real, existe uma impossibilidade técnica de cuidar direito de uma cidade como São Paulo, o crescimento da cidade e a sazonalidade, já são motivos para gerar um contínuo atraso. Além disso, existe a impossibilidade de tratar incidentes, estacionamentos irregulares, buracos na rua, eventos inesperados que acontecem no dia a dia”.

E1 exemplifica esta situação com a experiência percebida no período da copa do Mundo: “Durante os jogos o movimento ficava bem baixo e os semáforos se adaptavam a essa demanda”.

#### 4.3.2.1.3 Aumento do tráfego

Kanungo, Sharma e Singla (2014) destacam que os congestionamentos no trânsito são um problema sério hoje em dia. Embora pareçam permear por toda parte, as

megacidades são as mais afetadas por ele. A preocupação por um aumento nos congestionamentos, ainda maior em curto espaço de tempo, é trazido por Frank, Khamis e Zayegh (2019); Sangster, Persad e Duncan (2009). “Estima-se que o número de veículos deverá duplicar nas próximas décadas” (Alkhatib & Sawalha, 2020, p.311). Para Munst et al. (2015), as situações em que o tráfego está denso, poderiam ser controladas eficientemente com as capacidades do sistema em tempo real. A otimização do tráfego pesado é trazida por Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016) como uma questão importante a ser enfrentada, e na qual os semáforos em tempo real desempenham um importante papel.

E3 concorda à medida que reconhece que: “A tecnologia sofreu um embate muito grande no crescimento forte das cidades, no volume de tráfego”.

Este aspecto é evidenciado pelo que disse o participante E4:

“Em São Paulo, a demanda de veículos é muito maior do que a oferta de ruas, isso é saturação. Para ter um sistema semafórico que extraia o máximo da oferta que tem, ou seja, faça com que aquele sistema produza o maior volume de passagem possível, precisa do tempo real. É uma implementação necessária para um sistema saturado porque ele consegue fazer micro ajustes, com uma dinâmica muito grande”.

#### 4.3.2.2 SOCIOAMBIENTAL

##### 4.3.2.2.1 Melhora da Segurança

Serrano, Conde, Rodríguez-Aragón, Montes e Cabello (2005), apontam que os cruzamentos são um problema desafiador na segurança dos pedestres. Eles respaldaram esta afirmação com estatísticas do Reino Unido indicando que 61% dos acidentes com ferimentos pessoais acontecem dentro de um raio de 20 metros de um cruzamento e que, nos EUA, 30% dos acidentes ocorrem nos próprios cruzamentos. Isso permitiu aos autores sugerirem que soluções técnicas viáveis, reduzindo este tipo de acidentes em 50%, salvariam de 6.000 a 7.000 vidas por ano apenas na Europa. Juntamente com Serrano et al., Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016); Munst, Dannheim, Mäder, Gay, Malnar, Al-Mamun e Icking (2015); El Hassak e Addaim (2019), consideram que o sistema em tempo real contribui para a melhoria da segurança.

O participante E4 ilustra a realidade de São Paulo, em que 15% dos atropelamentos de pedestres na cidade acontecem nos cruzamentos, o restante no meio de quadra. A segurança também é retratada por E1: “A implantação de semáforos em tempo real ajuda a reduzir congestionamentos e melhora a segurança. Um projeto deste se paga em pouco tempo pelo benefício social que apresenta”.

#### 4.3.2.2.2 Redução dos congestionamentos

Segundo Kanungo, Sharma e Singla (2014); Al-qutwani e Wang (2019) algumas causas do congestionamento, apesar de inter-relacionadas, não podem ser controladas por meio do sistema semafórico, tais como: capacidade insuficiente das vias e demanda desenfreada; já os atrasos nas temporizações podem, e o sistema em tempo real, tido como um aliado na diminuição do congestionamento, possibilita uma gestão mais eficaz do tráfego. Kataria e Rani (2019); Munst, Dannheim, Mäder, Gay, Malnar, Al-Mamun e Icking (2015) argumentam que o congestionamento é resultado de uma gestão inadequada do tráfego e os semáforos em tempo real são confiáveis e eficazes, contribuindo para um fluxo de tráfego mais eficiente.

Manasi, Nishitha, Pratyusha e Ramesh (2020); Alaidi, Aljazaery, AlRikabi, Mahmood e Abed (2020); Nor, Zaman e Mubdi (2017); El Hassak e Addaim (2019); Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016) apontam os impactos do congestionamento e a necessidade de reduzir o tempo de espera nas interseções como uma importante motivação para a implantação dos semáforos inteligentes.

Alkhatib e Sawalha (2020), com a proposta de disponibilizar novas tecnologias para gerenciar os cruzamentos de forma inteligente e apropriada ao fluxo real de veículos, buscam contribuir com um dos grandes desafios das cidades populosas - a redução dos congestionamentos e com eles a perda de tempo e frustração. Estas soluções funcionam como alternativas ao desenvolvimento de novas infraestruturas como pontes e túneis, custosas, inviáveis financeiramente e, muitas vezes, limitadas pela falta de espaço.

E1 destaca que:

“São Paulo é uma cidade sempre congestionada, onde a lentidão é predominante. Neste caso, a implantação de semáforos inteligentes ajuda a reduzir congestionamentos. O

sistema é muito benéfico quanto maior for o nível de congestionamento, porque ele resolve lentidões, se adaptando às necessidades e respondendo em tempo real”.

#### 4.3.2.2.3 Redução do consumo de combustível

Munst et al. (2015); Alkhatib e Sawalha (2020) apontam como uma das motivações para a implantação dos semáforos em tempo real o menor consumo de combustível, gerado por um fluxo de tráfego mais eficiente, com menos atrasos.

#### 4.3.2.3 SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS

##### 4.3.2.3.1 Evolução do sistema em tempo fixo

Ameddah, Das e Almhana (2018) apontam que os tempos dos semáforos, calculados a partir do registro histórico do fluxo dos veículos são pré-determinados. Embora sua configuração mude de acordo com a hora do dia, eles não podem reagir ao comportamento do tráfego devido à sua natureza estática. Para Al-qutwani e Wang (2019); Lin, Li, Chen, Fu e Chi (2016); Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016) esses semáforos em tempo fixo possuem várias limitações, haja vista não conseguir lidar com o aumento da necessidade de tráfego de veículos, as mudanças do fluxo do tráfego e com o constante incremento do número de veículos no dia a dia.

O aspecto é aceito pelos entrevistados. E1 explica: “Para lugares que não são saturados, o semáforo em tempo fixo bem regulado atende perfeitamente, responde adequadamente, mas para regiões saturadas não.” A limitação dos planos fixos também é apontada por E2:

“Manter os planos em tempo fixo para uma cidade como São Paulo é impossível. No começo se tentou, mas a complexidade da coleta dos dados, da análise, da configuração nas vias, na validação do funcionamento, dos ajustes finos, se torna impossível”.

E4 afirma que “O problema começa quando o sistema fica saturado, o sistema em tempo fixo tem muitas limitações que não atendem a esta realidade, por não ser adaptativo”. E2 complementa a importância da evolução para tempo real ao afirmar que:

“No tempo fixo acaba sempre sendo obrigado a colocar um tempo de ciclo maior do que ele precisava ser em geral, porque precisa dar um coeficiente de segurança. É melhor deixar os carros esperando um pouco mais do que ficar apertado, gera uma fila”.

No caso dos semáforos em tempo real os veículos não ficam esperando desnecessariamente. Com a substituição dos semáforos em tempo fixo por tempo real, os tempos de ciclo caíram muito, afirma E2.

#### 4.3.2.3.2 Disponibilidade tecnológica

Miz e Hahanov (2014) indicam que a evolução tecnológica com a integração do semáforo inteligente ao sistema de tráfego exclui erros causados pelo fator humano, uma vez que a substituição por este sistema, otimiza os processos de gestão de tráfego realizados por autoridades governamentais.

E3 relata que “a importância em se fazer a regulação semafórica era mais do que evidente e que se exigia muita base técnica e teórica, porém novas soluções estavam disponíveis”. A evolução da tecnologia também é apontada por E4:

“Com a evolução natural da tecnologia e também a necessidade de se expandir esse comando centralizado de semáforos, a opção tecnológica mais avançada era o sistema em tempo real. Era um investimento natural de uma empresa que faz a gestão do trânsito numa cidade como São Paulo, uma evolução para o sistema em tempo fixo que tinha aqui e que funciona até hoje no mundo inteiro”.

#### 4.3.2.3.3 Facilidades do controle centralizado

No documento D1, Cury (1977) afirma que o controle centralizado permite a coordenação da área, além da supervisão centralizada do tráfego na região sob seu controle, monitoramento do estado operacional dos equipamentos instalados nas vias públicas e torna possível a intervenção do operador remotamente no controle dos semáforos.

E4 concorda com os argumentos da centralização: “Com a centralização é possível fazer ajustes mais dinâmicos e compensar a perda de capacidade que algum evento gerou”. E2 complementa ao afirmar que: “Muitos erros acontecem porque o pessoal da

manutenção vai lá no semáforo e fica teclando no *keyboard* (teclado que se conecta ao controlador para efetuar mudanças locais de programação)”. Isso poderia ser evitado com a centralização destas atividades.

#### 4.3.2.4 CONCESSÃO DE PRIORIDADE

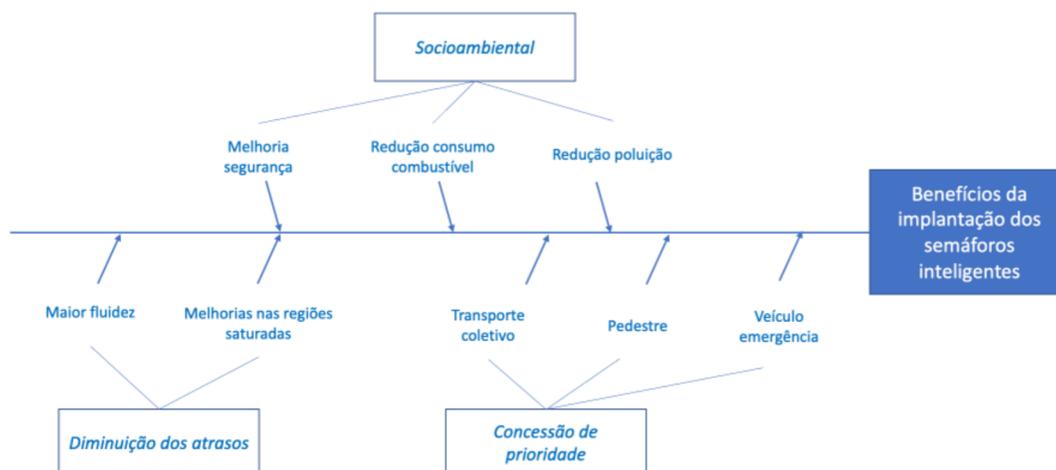
##### 4.3.2.4.1 Veículos de emergência

Ameddah, Das e Almhana (2018); Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016) enfatizaram esforços na prioridade concedida aos veículos de emergência a fim de que passem pelos cruzamentos antes dos demais. Eles buscam com isso que esses veículos especiais não fiquem presos nos congestionamentos e tenham passagem mais rápida pelos cruzamentos, sejam eles ambulâncias, veículos de resgate, corpo de bombeiros, polícia, assim como pessoas muito importantes (*VIPs* em inglês).

As motivações apontadas pela literatura, quais sejam: redução do consumo de combustível e veículos de emergência não foram tratadas pelos participantes em suas entrevistas neste tópico da pesquisa, mas foram mencionadas como benefícios.

#### 4.3.3 BENEFÍCIOS

Os benefícios no uso dos semáforos inteligentes foram apontados nos artigos da RSL, assim como nas entrevistas e nos documentos analisados. As subcategorias de benefícios e seus respectivos códigos agrupados estão representados na Figura 22, e se encontrarão detalhados nesta seção.



**Figura 22.** Agrupamento de códigos e subcategorias de Benefícios.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise das entrevistas, foram identificadas 46 citações relacionadas aos benefícios do controle semafórico inteligente, tendo suas frequências demonstradas na Figura 23.

| Código                              | Frequência | Categoria  | Subcategoria         |
|-------------------------------------|------------|------------|----------------------|
| Transporte Coletivo                 | 11         | BENEFÍCIOS | CONCESSÃO PRIORIDADE |
| Melhorias Regiões Saturadas         | 10         | BENEFÍCIOS | DIMINUIÇÃO ATRASOS   |
| Melhoria segurança                  | 7          | BENEFÍCIOS | SOCIOAMBIENTAL       |
| Pedestre                            | 6          | BENEFÍCIOS | CONCESSÃO PRIORIDADE |
| Maior Fluidez                       | 4          | BENEFÍCIOS | DIMINUIÇÃO ATRASOS   |
| Redução Poluição                    | 3          | BENEFÍCIOS | SOCIOAMBIENTAL       |
| Veículo Emergência                  | 3          | BENEFÍCIOS | CONCESSÃO PRIORIDADE |
| Redução Consumo Combustível         | 2          | BENEFÍCIOS | SOCIOAMBIENTAL       |
| <b>Resultado: 8 de 33 Código(s)</b> |            |            |                      |

**Figura 23.** Frequência das citações do tema Benefícios.  
Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos do Atlas.ti.

A Figura 23 mostra que o código de transporte coletivo foi o que mais recebeu citações dos entrevistados dentro desta categoria, seguido das melhorias nas regiões saturadas e demais códigos. Importante salientar que a subcategoria socioambiental ganha destaque no conteúdo das entrevistas como benefício da implementação dos semáforos em tempo real.

#### 4.3.3.1 SOCIOAMBIENTAL

#### 4.3.3.1.1 Melhoria da Segurança

Kanungo, Sharma e Singla (2014) enfocam sua pesquisa na mudança da temporização semafórica de acordo com a densidade de veículos nas vias, visando assim reduzir o congestionamento do tráfego e conseqüentemente a redução do número de acidentes. Ager (2014) aponta no documento D3, a redução dos acidentes como um dos fatores de maior importância quando se lida com a Engenharia de Tráfego. Vilanova, Cucci e Fernandes (2005) mostram no documento D5 uma média de redução na ocorrência de acidentes de cerca de 19 %, no entanto, trazendo os resultados obtidos na implementação realizada na Cidade de São Paulo na década de 1990, a redução dos atropelamentos alcançou 44%.

E2 reitera que “Para a implantação de São Paulo, a programação foi muito trabalhada, obtendo com isso, resultados bastante importantes com relação à segurança”. E4 agrega a este aspecto: “O foco inicial do projeto não estava relacionado à segurança. Não se ouvia este discurso, mas de fato, após analisar alguns dados foi percebido que os acidentes estavam reduzindo, bastante”. E4 justifica que “As ociosidades são diminuídas com o sistema, reduzindo a espera do pedestre, não gerando falsas brechas porque o trânsito fica compactado”. Essa redução é benéfica tanto para o motorista quanto para o pedestre, mas E4 complementa: “O levantamento realizado mostra que para o pedestre foi melhor”. Este aspecto é evidenciado pelo exemplo trazido por E1 com uma funcionalidade criada na última versão do software *SCOOT*:

“Quando eles percebem que os pedestres estão solicitando menos passagem, por exemplo, estão apertando menos a botoeira, o estágio de pedestre nem está sendo dado, por vários ciclos seguidos ele recalcula o ciclo, isso basicamente em períodos de pouco movimento. Com a diminuição do ciclo, diminui o atraso de todo mundo, dos pedestres e dos carros também, da rede inteira”.

#### 4.3.3.1.2 Redução do consumo de combustíveis

Kanungo, Sharma e Singla (2014); Alkhatib e Sawalha (2020); Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019) indicam que com o uso de semáforos em tempo real, os congestionamentos e os tempos de espera dos veículos são reduzidos, proporcionando com isso, entre outros benefícios, redução no consumo de combustível. No documento

D3, Ager (2014) concorda com essa afirmação uma vez que, de acordo com medições realizadas em campo, com a implementação dos controles semaforicos em tempo real em São Paulo na década de 1990, a redução no consumo de combustíveis foi de até 6 %.

Os entrevistados se mostraram de acordo com este aspecto, como relata E4: “A vantagem da redução de atrasos é enorme, porque além do tempo de viagem menor, menos combustível é gasto, gerando menos poluição. O retorno é fabuloso!”. E2 concorda com este posicionamento ao afirmar que “São aspectos como este (semáforos em tempo real) que ajudam as pessoas a gastar menos combustível, menos tempo, menos horas sociais”.

#### 4.3.3.1.3 Redução da poluição

A redução da poluição é relacionada por Alkhatib e Sawalha (2020); Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019) como um benefício pela implementação dos semáforos em tempo real, em função da redução dos congestionamentos do tráfego e tempo de espera do veículo, tendo como consequência a redução de emissões e da poluição ambiental. Os entrevistados concordaram com este aspecto na medida em que haja reduções de congestionamentos.

#### 4.3.3.2 DIMINUIÇÃO DOS ATRASOS

##### 4.3.3.2.1 Maior fluidez

O primeiro aspecto identificado na literatura relacionado à diminuição dos atrasos, refere-se à diminuição dos congestionamentos e consequente aumento da fluidez, assim como a redução do tempo de espera dos veículos nos cruzamentos (Kanungo, Sharma & Singla, 2014; Al-qutwani & Wang, 2019; Alkhatib & Sawalha, 2020; Razavi, Hamidkhani & Sadeghi, 2019). No documento D5, Vilanova, Cucci e Fernandes (2005) apontam que com a implantação dos semáforos em tempo real em São Paulo, constatou-se uma economia do tempo de espera nos semáforos de 20%, ganho bastante relevante se comparado com outras cidades que atingiram entre 10 e 15% de redução com essa implementação.

Os entrevistados respaldaram a literatura por meio dos dados obtidos com a implementação de semáforos inteligentes ocorrida em São Paulo na década de 1990. E1 e E2, por exemplo, apontaram a redução do tempo de viagem e da média de atrasos de 20% a 30%. E4 relata que houve uma redução de 50% nos congestionamentos na época. E4 enfatiza que: “Os benefícios foram acima do esperado, gerando menos perdas e menos atrasos. O sistema conseguiu extrair resultados muito além do que se imaginava, por meio dos micro ajustes”. As reduções também são apontadas por E1: “Foram identificadas menos perdas e menos atrasos. Cada pequena configuração gera resultados surpreendentes”.

#### 4.3.3.2.2 Melhorias nas regiões saturadas

Munst et al. (2015) indicam as capacidades que o sistema em tempo real tem em controlar eficientemente situações de tráfego denso. Com exceção de um dos entrevistados, os demais reiteram o bom funcionamento do sistema em tempo real nas regiões saturadas. E1 afirma que: “O sistema é muito benéfico quanto maior for o nível de congestionamento, porque ele resolve lentidões”. Colabora com este aspecto o que descreve E4 ao mencionar que “O sistema conseguiu resolver problemas em lugares que eram dados como casos perdidos, completamente saturados. É um sistema operando em um lugar que já estava no limite, mas os resultados são inesperados”. O entrevistado E2 exemplificou áreas com tráfego muito grande que tiveram excelentes resultados:

“Avenidas que viviam congestionadas como a Consolação e a Bernardino de Campos, ficaram boas. No entanto, numa cidade como São Paulo, no momento seguinte ela pode voltar a ter problema, porque a demanda pode estar represada, outros caminhos são adotados”.

Em contrapartida, o entrevistado E3, aponta que: “Na saturação esses sistemas não dão o resultado esperado, necessitando direcionar os esforços às obras estruturais e civis”. Nesse sentido, torna-se relevante complementar com uma colocação de E2: “Existe uma afirmação bastante repetida, de que o sistema em tempo real é muito bom para uma situação não muito saturada, para área saturada não vai conseguir resolver”. E2 complementa: “Na verdade qualquer simulador aponta para esse resultado, mas na prática, os lugares mais saturados funcionam melhor”. Os dados levantados tanto na literatura, como nas demais entrevistas, confirmam esse posicionamento.

### 4.3.3.3 CONCESSÃO DE PRIORIDADE

#### 4.3.3.3.1 Transporte coletivo

Este aspecto foi relacionado no estudo apesar de não ter sido identificado na literatura técnica pesquisada. No entanto, por existir uma importante linha de estudos e iniciativas relacionadas à mobilidade urbana, sobre transportes coletivos, o aspecto foi incluído na pesquisa, corroborado pelos relevantes comentários oriundos das entrevistas.

Conforme evidenciado pelo participante E3, deve ser concedida prioridade aos ônibus, por meio de corredores com controle semafórico. Segundo E3:

“Por meio da atuação semafórica, onde tem linhas de ônibus, deve ser fornecida prioridade. Assim que o ônibus se aproximar do cruzamento, dar prioridade. Atualmente, com a facilidade de instalar equipamentos nos ônibus e nos semáforos, isso é possível fazer”.

No entanto, o posicionamento dos demais entrevistados é discordante desta colocação, mas convergem entre si, à medida que eles afirmam que os ônibus não necessitam de prioridade exclusiva, eles se beneficiam da prioridade concedida aos veículos. Segundo explanado por E2: “O transporte coletivo é mais importante, mas ele está imerso no trânsito, ele (ônibus) está entre os carros e vai se beneficiar pelo que for feito para eles. A defasagem do carro serve perfeitamente para ele (ônibus)”. O entrevistado E1 ressalta que a priorização exclusiva prejudica o tráfego de uma forma geral: “A priorização teria que ser acionada com muita frequência e com isso as transversais não andariam”. E1 complementa: “Em São Paulo, onde existem muitos ônibus, o sistema foi configurado para ter prioridade sempre, dando o tempo máximo de verde para aquele cruzamento”. Para ilustrar, E2 compartilhou um experimento realizado quando da implantação do sistema em São Paulo:

“Foi feito um experimento dando prioridade total para os ônibus na avenida Paulista. Com isso, as transversais começaram a travar e a própria avenida, e os ônibus que estavam lá ficaram parados. O ônibus está imerso lá! Se prejudicar o transporte individual, os ônibus vão se prejudicar com o bloqueio das ruas: a transversal não conseguirá entrar e os ônibus não passarão”.

Este aspecto é ressaltado por E4, quando aponta que não há benefícios para o transporte coletivo concedendo prioridade a ele: “É ilusório dar prioridade para o ônibus,

em um lugar que é saturado”. Com o intuito de justificar esta afirmação, E4 exemplificou uma situação usualmente encontrada nas vias:

“As vias têm uma faixa exclusiva para os ônibus e três faixas para veículos. Elas estão recebendo verde ao mesmo tempo. A saturação, das faixas dedicadas aos veículos, numa avenida importante de São Paulo, é muito maior do que a única faixa de ônibus. Então, o verde que atenderá os veículos, atenderá os ônibus e sobrar. Se for concedido mais tempo de verde para o ônibus passar, não vai haver ganho, porque a parada dele é inevitável, seja no ponto de ônibus ou no próximo semáforo”.

Agregando ainda mais argumentos a este aspecto, segundo E4:

“Ele terá um desempenho melhor que os automóveis porque a faixa dele é muito menos saturada que a dos veículos. Quando o sistema inteligente foi implantado na avenida Consolação não foram colocados laços detectores nas faixas de ônibus, eles utilizavam os tempos de verde calculados para os veículos”.

Adicionalmente, E4 reitera a necessidade de priorizar os transportes coletivos: “Se houver alguma tecnologia que possa priorizar os ônibus, tem que fazer, mas no sistema saturado, em tempo real, onde o ônibus anda paralelo ao fluxo de tráfego, não existe sentido”.

#### 4.3.3.3.2 Pedestre

De acordo com o documento D9, uma possibilidade de implementação para conceder prioridade para pedestres, consiste na utilização de sensores de presença em travessias semaforizadas. Podem ser utilizados diferentes tipos de sensores: o sensor de calçada é responsável por identificar a presença de pedestres aguardando para atravessar e, caso o pedestre tenha realizado a travessia da via sem aguardar o verde, o sensor cancela a solicitação de acionamento do verde para os pedestres, evitando com isso paradas inúteis dos veículos. Complementarmente, existem os sensores de pista, que identificam a presença de pessoas realizando a travessia. Se o sensor verificar que ao final do tempo de travessia ainda há pedestres atravessando a rua, interfere na programação semafórica e aumenta o tempo disponibilizado para a travessia. Dessa maneira o sensor atua para aumentar a segurança do pedestre (Freire, 2020).

O entrevistado E1, enfatiza a necessidade da concessão de prioridade quando for necessário, quando houver pedestres:

“Os sensores na travessia de pedestre são colocados para alongar o tempo quando há mais pedestres e, se houver menos, o tempo é reduzido. O importante é dar prioridade quando é necessário e não dar tempo para o pedestre, parando os veículos, mesmo que não haja necessidade, se não houver mais pedestres”.

Bonetti e Pietrantonio (2006) destacam a importância da definição de tempos adequados para a travessia, tornando os mesmos mais seguros, evitando com isso que os pedestres aproveitem uma brecha para atravessar. Este aspecto é evidenciado pelo exemplo trazido por E1 numa implementação de detecção de pedestre realizada em São Paulo:

“Foram colocados sensores na travessia de pedestre, alongando o tempo quando há mais pedestres e se houver menos, corta o tempo. Nos relatórios desse cruzamento, o sistema cortou o tempo dos pedestres em 80% dos ciclos, o tempo dos ciclos foi mais curto que o programado porque não havia necessidade de manter os intervalos para pedestres e, se deixasse, o carro iria desrespeitar”.

E1 acrescenta que se não tivesse sido implementado a detecção de pedestre o veículo pararia desnecessariamente: “Ninguém está sendo beneficiado, nem o veículo, nem o pedestre, porque não tem (pedestre) para atravessar. No caso, o sistema faz prioridade inteligente”. E3 complementa este aspecto ao dizer que “O vermelho total para a prioridade da travessia de pedestre, ficando tempos e tempos parado sem nenhum pedestre atravessar, não ajuda ninguém, nem carro, nem pedestre”.

#### 4.3.3.3 Veículo de emergência

Ameddah, Das e Almhana (2018); Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016) desenvolveram a solução para veículos de emergência motivados pelo benefício gerado por sua implementação. No entanto, este aspecto não se confirma, segundo as citações dos entrevistados que indicam não existir muitos benefícios nesta implementação em função do grande volume de tráfego, conforme relata E4:

“Os veículos de emergência têm prioridade natural, eles têm a sirene e conseguem andar. A perda de velocidade, de tempo, desses veículos, é no congestionamento, e no congestionamento, se o semáforo está verde ou não, importa pouco, pois ele vai ficar parado longe do semáforo”.

E4 complementa que essa análise precisaria ser mais aprofundada para não incorrer em maiores prejuízos para o tráfego, interrompendo o percurso das transversais,

onde também poderiam se encontrar outros veículos de emergência. E2 concorda afirmando que “A solução para veículos de emergência é mais complicada do que dar verde quando a ambulância chega”. Segundo ele, o que prejudica os veículos de emergência é a fila de veículos que está na frente deles até chegarem num cruzamento e uma solução concedendo mais tempo de verde, poderia impactar ainda mais o tráfego. Para E1 a solução poderia ser aplicável usando Internet das coisas (em inglês *IoT*), segundo ele: “A utilização de *IoT* talvez seja viável para veículos de emergência, para dar uma rota prioritária”. Questionado se poderia impactar a rede, ele justifica que não pela pequena quantidade de veículos de emergência comparativamente aos demais veículos circulando pela cidade.

#### 4.3.4 BARREIRAS E DIFICULDADES

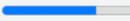
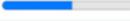
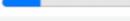
As barreiras e dificuldades na implementação dos semáforos inteligentes foram apontadas com bastante frequência no conteúdo das entrevistas. A Figura 24, representa as subcategorias, assim com os respectivos códigos agrupados que retratam as Barreiras e Dificuldades e que serão detalhados nesta seção.



**Figura 24.** Agrupamento de códigos e subcategorias de Barreiras e Dificuldades.

Fonte: Elaborado pela autora

Este tema foi o mais citado pelos participantes, recebendo 70 citações nos conteúdos das entrevistas, sendo agrupadas nas codificações demonstradas na Figura 25. O código que recebeu mais citações dentro desta categoria foi o que se refere à necessidade de Manutenção Contínua na implementação dos sistemas de controle semafórico.

| Código                              | Frequência   | Categoria | Subcategoria            |
|-------------------------------------|--|-----------|-------------------------|
| Manutenção Contínua                 |  18 | BARREIRAS | VARIÁVEIS TÉCNICAS      |
| Funcionamento Acurado               |  12 | BARREIRAS | VARIÁVEIS TÉCNICAS      |
| Altos Custos                        |  10 | BARREIRAS | GIGANTISMO              |
| Continuidade Gestão Pública         |  9  | BARREIRAS | POLÍTICO ADMINISTRATIVO |
| Planejamento Projeto                |  9  | BARREIRAS | POLÍTICO ADMINISTRATIVO |
| Abrangência Área Atuação            |  6  | BARREIRAS | GIGANTISMO              |
| Influência política                 |  5  | BARREIRAS | POLÍTICO ADMINISTRATIVO |
| Modernização Tecnologia             |  1  | BARREIRAS | POLÍTICO ADMINISTRATIVO |
| <b>Resultado: 8 de 33 Código(s)</b> |  |           |                         |

**Figura 25.** Frequência das citações do tema Barreiras e Dificuldades.

Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos do Atlas.ti.

Com base na Figura 25, observa-se que apesar das questões técnicas terem maior frequência de citações, a subcategoria político administrativa tem expressiva relevância no posicionamento dos entrevistados e, certamente, deverá ter seus aspectos observados numa futura implementação de controle semafórico.

#### 4.3.4.1 POLÍTICO-ADMINISTRATIVO

##### 4.3.4.1.1 Modernização da tecnologia

O avanço da tecnologia tem ofertado novas alternativas de soluções em vários campos de atuação e no de controles semafóricos, particularmente, não é diferente. No entanto, o participante E3, não vê a mesma agilidade na adoção destas ofertas pelo setor público. Segundo E3:

“O avanço da tecnologia obviamente traz dificuldades do setor público se modernizar na mesma velocidade, após a implantação e o investimento feitos, passados quatro, oito anos, em outros governos, nova licitação não pode garantir que o vencedor seja aquele que já estava lá instalado”.

##### 4.3.4.1.2 Continuidade na gestão pública

Um aspecto abordado por todos os participantes foi o relacionado à descontinuidade na gestão pública, podendo gerar com isso mudanças de prioridades,

alteração de diretrizes ou até mesmo interrupções em projetos que estão em curso. O participante E3 enfatizou o impacto gerado pelo aspecto relacionado à grande frequência de governos. Segundo ele:

“A todo momento, existe o envolvimento dos nossos órgãos (governamentais) nesse processo de mudança, porque quando muda o governo mudam muitas pessoas, muitos cargos de confiança. A questão de descontinuidade é sofrível... Junto com isso está a questão da necessidade e da prioridade, não se consegue garantir que o investimento siga numa determinada área”.

Com isso, se o projeto foi priorizado numa gestão e na próxima as prioridades são outras, o projeto sofre impactos, com consequências inclusive de descontinuidade. O participante E2 concorda com esta afirmação: “A descontinuidade administrativa é um problema, não se sabe se daqui a três ou quatro anos vai ter um projeto novo”. Colabora com este aspecto o que descreve o participante E1: “Esses tipos de projeto são uma questão política, onde existem várias prioridades diferentes, pode haver necessidade de priorizar em outro setor”. E3 complementa a importância deste aspecto:

“Existe uma demora muito grande para se definir as coisas e quando se define existe a mudança (de gestão). Agora o novo vai querer entender tudo de novo e não se sabe o que irá acontecer. Essa questão da morosidade tem um viés de tudo: a questão da descontinuidade, alternância de governo com muito curto prazo, o grande número de cargos de confiança, quando se muda um governo se muda toda a estrutura de governança. Desta maneira não dá para evoluir”.

Todos os entrevistados concordam com a importância da gestão pública no processo, mas a fala de E4 chama a atenção, quando ele menciona a importância de um Plano Diretor de Semáforos, inserido num plano maior de Transportes ou Mobilidade, como mitigador da descontinuidade das ações geradas pelas mudanças de gestão:

“Com um Plano Diretor de Semáforos é possível estabelecer os objetivos, como o sistema semafórico deve ser. Aí, começa a estabelecer regras, diretrizes e cronogramas físicos e de investimento para ir cumprindo, além de definir quem são os atores envolvidos com isso”.

#### 4.3.4.1.3 Influência política

A questão de mobilidade urbana e mais especificamente os temas relacionados à parte semafórica, não estão exclusivamente restritas ao âmbito técnico, existe uma

variável política bastante relevante que influencia nas tomadas de decisão. Todos os participantes concordam com esse aspecto. O entrevistado E4 destaca que: “No caso de uma cidade, não se consegue tratar o tema (controle semafórico) tecnicamente porque tem muita influência política, muita interferência política”. E1 concorda com essa afirmação à medida que fala: “Não se trata de uma questão técnica, se trata de uma questão política e econômica”. E2 atribui a ausência de políticas públicas à continuidade de uma operação de semáforos em tempo real: “A falta de políticas públicas e prioridade impactam a manutenção do sistema”. Por fim o participante E3 afirma que “Grande dificuldade no setor público para manter a operação”.

#### 4.3.4.1.4 Planejamento do projeto

A manutenção e a necessidade de celebrar contratos de manutenção dos equipamentos e da infraestrutura, aspectos abordados anteriormente, também se vê refletido como uma debilidade administrativa. Neste caso, todos os participantes concordam com a importância na execução de manutenção contínua e frequente, para garantir a continuidade do funcionamento do sistema. Concorda com esse aspecto o participante E1: “Importante ter planejamento de longo prazo. Garantir que a implementação será mantida a longo prazo”. Além disso, a visão mais abrangente do projeto, envolvendo todas as partes necessárias, garantindo o sentido de pertencer ao projeto e o compromisso, foram apontados como uma oportunidade de melhoria pelo participante E2. Por fim, o participante E4 destacou que poderia ter havido um planejamento de entregas por subáreas, garantindo a sincronia entre a entrega das obras de infraestrutura e as instalações de equipamentos, com isso o benefício do projeto poderia ser mais rapidamente percebido.

#### 4.3.4.2 GIGANTISMO

##### 4.3.4.2.1 Altos custos

Guerrero, Zeadally e Contreras (2018) apontam o alto custo de instalação, manutenção e regulação dos semáforos inteligentes. Com base na implantação de São Paulo, todos os entrevistados concordam com esse aspecto e salientam os altos custos envolvidos com a infraestrutura, implantação e manutenção do sistema. Colabora com este aspecto o que descreve E1 ao ressaltar a importância de uma análise prévia de

benefício/custo para a implementação em São Paulo na década de 1990, para identificar onde compensaria implantar o sistema:

“O sistema é caro, a infraestrutura física que precisava, custava muito. Teria que ter certeza que onde fosse implantado a relação benefício/custo seria significativa. Foi feito um estudo, fazendo simulações para saber em que locais, em que cruzamentos, valeria a pena implantar esse sistema, porque implantar onde tiver pouco tráfego, o benefício é pequeno. O sistema é muito benéfico quanto maior for o nível de congestionamento”.

Os sistemas são caros e difíceis de manter porque para funcionar, da maneira como foram implantados em São Paulo, exigem dois componentes básicos para seu funcionamento: infraestrutura de comunicação e detecção, ambos muito caros. É o que relata E1: “A detecção e a comunicação são sistemas essenciais para o sistema inteligente, em tempo real, funcionar. A comunicação encarece, pois deve ser feita com fibra óptica, em dutos e os cabos têm que estar protegidos”. E4 complementa este aspecto ao dizer que “O sistema não é barato”. Segundo ele, isso se dá por vários motivos:

“Desde o *software*, até a instalação são caros. Toda a infraestrutura é cara, assim como a manutenção. O “remédio tempo real”, diante do que ele custa, deve ser aplicado em sistemas saturados, no sistema principal da cidade, onde tem que extrair o máximo rendimento possível”.

Este aspecto é reiterado pelo que disse o participante E2, “O tempo real tem que procurar chegar num nível de benefício/custo razoável, porque é um sistema caríssimo. Tem que deixar passar mais veículos, dar mais fluidez e provar isso”.

#### 4.3.4.2.2 Abrangência da área de atuação

A dimensão da área de atuação do sistema implantado em São Paulo foi destacada por todos os entrevistados. A quantidade de cruzamentos definida pelo projeto era bastante significativa, 1500 locais foram instalados. De acordo com E4:

“Muitos cruzamentos requerem um trabalho enorme de instalação, porque como a ligação entre eles era física, havia cabos conectando 1500 semáforos em cinco centrais diferentes. Era preciso uma rede de comunicação enorme, custosa, com uma necessidade de manutenção muito eficiente”.

Os desafios também foram apontados por E2: “O cronograma de implantação foi terrível, um atrás do outro. É um negócio complexo para programar o tempo real, é trabalhoso, demorado”. E3 complementa apontando que “A cidade crescia a taxas

maiores do que a evolução daquele equipamento”. Apesar da área de atuação ser grande, o participante E4 sugere que a implementação poderia ter sido feita por subáreas, como salienta E4: “As coisas (instalações) não poderiam ser feitas em escala, tinha que ser por subárea, sincronizando a instalação de laços e dutos com rede de transmissão de dados e controladores”.

#### 4.3.4.3 VARIÁVEIS TÉCNICAS

##### 4.3.4.3.1 Funcionamento acurado

Toda a eficiência do sistema em tempo real depende da obtenção de dados acurados de fluxo veicular e da sua transmissão ao computador central para a execução dos algoritmos de cálculo das temporizações semaforicas. Para a identificação do fluxo veicular, são implantados dispositivos de detecção nos locais onde se deseja coletar as informações. O sistema implementado em São Paulo fez uso de laços indutivos, o sistema de detecção mais comumente utilizado. Colabora com este aspecto o que ressalta E4: “Os sistemas semaforicos precisam de uma instalação bem feita, emendas corretas, cabos corretamente dimensionados, laços precisam sofrer vistorias”. Afirmção reiterada pelo que disse o participante E3: “Os laços com deformação no asfalto tiravam a confiabilidade dos dados”. E2 aponta como a maior dificuldade para manter os semaforos funcionando o sistema de detecção:

“O sistema de detecção eletromagnético é a melhor coisa que tem, mas o asfalto estraga, obras da Eletropaulo (companhia de energia) quebram, ele acaba se deteriorando, começa a entrar água. Se puder sair do sistema de laços seria bom, porque a instalação é cara, precisa levar o laço até o controlador e até a central, o laço quebra...”.

As câmeras poderiam ser uma alternativa segundo E2, mas elas apresentam alguns erros na detecção: “Caminhão com alguma irregularidade pode ser interpretado como dois carros; na transição luminosa, no crepúsculo, por utilizarem o *background*, podem existir falhas”.

Os entrevistados são unânimes em apontar que a detecção e a comunicação são essenciais para o funcionamento dos sistemas em tempo real. E1 salienta que, de acordo com as tecnologias disponíveis à época da implementação: “A comunicação tem que ser feita garantindo zero latência, ou latência muito baixa. Foi utilizada a fibra óptica para

assegurar a comunicação adequada”. O entrevistador E1 ressalta a importância do correto funcionamento na transmissão de dados, o que garante o funcionamento do sistema em tempo real:

“O sistema necessita uma latência muito baixa ou até igual a zero porque é em tempo real. E não é latência de um minuto que é problema, latência de segundos já impacta nessa operação. O veículo que está sendo detectado, o sistema calcula o tempo para este mesmo veículo. Existe muitos sistemas, por exemplo, que se dizem em tempo real, mas não é em tempo real puro, porque eles detectam o veículo e fazem o cálculo para o futuro. Na verdade, ele usa os dados do passado para fazer os cálculos de tempo para serem implementados no futuro. Existe uma inexatidão, porque aquele número que ele coletou não significa que vai ser igual para a nova quantidade (de veículos) que vai ter no futuro”.

Os sistemas inteligentes têm muito baixa tolerância à latência, em função da característica de funcionamento em tempo real. E4 afirma que:

“O sistema em tempo real não pode ter latência, isto é, não pode haver demora, nem que seja eventual, de um dado chegar no computador, deixa de ser efetivo. A latência não pode ser nem eventual, normalmente é imediata a transmissão, para um sistema saturado, isso faz diferença”.

#### 4.3.4.3.2 Manutenção contínua

Kanungo, Sharma e Singla (2014) destacam a exigência que alguns sistemas têm de realizar manutenção constante. Além disso, eles são comparativamente mais sujeitos a danos devido às condições externas adversas em que são implantados. Neste caso eles se referem aos laços detectores.

Todos os entrevistados concordam com a necessidade de que se executem manutenções constantes e contínuas nos sistemas e nos componentes dos quais ele depende para funcionar. Colabora com este aspecto o que E3 destaca: “Há dificuldade em manter o *hardware*, a temperatura, os laços se deformavam no asfalto”. E1 salienta que “Precisa ter disciplina para sempre mantê-los (os sistemas). A manutenção geral, uma revitalização, custará muito mais que a manutenção constante. Cabos e detectores precisam de manutenção contínua.” Neste caso, E1 detalha que não são exclusivamente os sistemas inteligentes, ou os laços detectores e cabos que exigem manutenção, segundo E1: “Câmeras também exigem custo de manutenção”. Ele alerta para o equívoco em se afirmar:

“Se não houvesse condição de dar manutenção, investiria no tempo fixo! Cuidado com esta afirmação, o sistema em tempo fixo bem regulado, também é difícil de manter, precisaria rever a programação pelo menos a cada seis meses de todos os cruzamentos”.

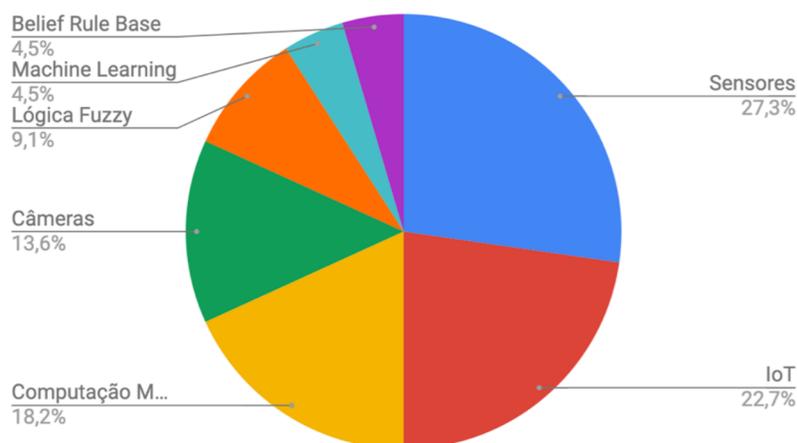
“O tempo fixo sem regular acaba sendo um exponenciador de atrasos, ele provoca atraso muito maior do que deveria. Isso impacta no aumento de acidentes e, principalmente, aumento de poluição” complementa o participante E4. Além disto, o impacto sofrido na implementação de São Paulo com o ineditismo da tecnologia de fibra óptica pela equipe e sua consequente falta de *know-how* em operá-la é destacado por E4. Segundo ele, “A fibra óptica é usada tanto para transmitir dados, como para transmitir imagens. Às vezes, uma fibra rompia, derrubava vários controladores e não se conseguia recuperar facilmente”. Para tanto, um contrato de manutenção também era necessário.

Os componentes desse sistema requerem uma manutenção efetiva, pois “Se um cabo é rompido, o sistema deixa de funcionar. Se o sistema de detecção deixa de funcionar, o sistema fica cego, não otimiza nada, deixa de ser eficiente” complementa E4. Em seu relato E2 enfatiza que antes de pensar na instalação de um sistema como esses em tempo real, dois pontos relacionados a manutenção devem ser observados: “1. Vou ter verba para manter, eu tenho esquema para manter; 2. Tenho gente para programar, eu tenho gente suficiente, suficientemente qualificada, que vai poder tocar essa operação”. E4 aponta que a manutenção é fundamental, principalmente em função do investimento realizado: “Não adianta comprar um sistema sofisticado se não tiver como manter ele funcionando”. E1 sustenta esta afirmação, reiterando a importância da disciplina para manter o sistema e a infraestrutura, segundo ele: “Se não tiver verba para manter, melhor não implantar”.

#### 4.3.5 TECNOLOGIAS

Para identificar as principais soluções de controles semafóricos inteligentes foi realizada uma RSL, sobre o estado da arte nessas tecnologias, desenvolvidas para atender a demanda variável de tráfego nas cidades. A literatura se refere às tecnologias de detecção do tráfego em tempo real, assim como aos algoritmos utilizados para cálculo das melhores temporizações semafóricas. Em termos de tecnologias analisadas pelas 22

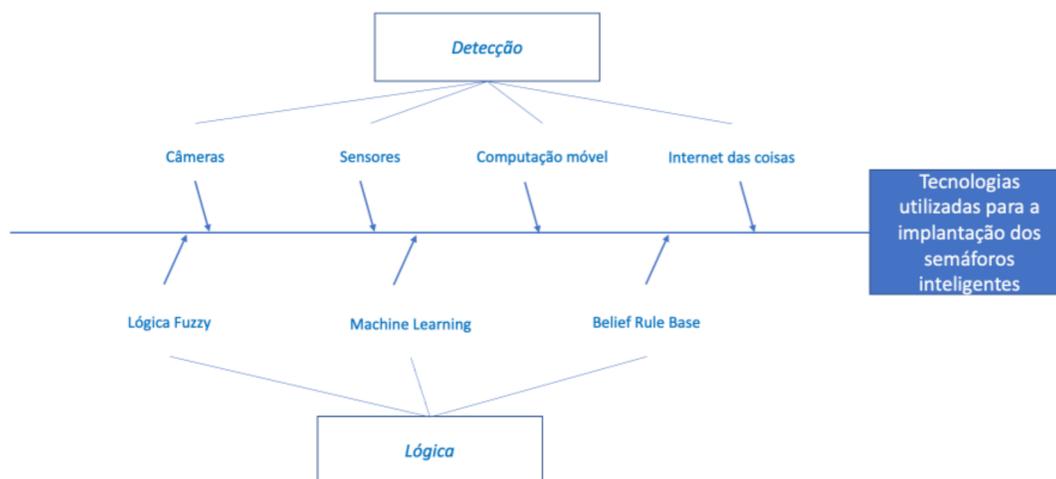
pesquisas selecionadas, estas foram agrupados em 6 diferentes temas: Câmeras, Computação móvel, *IoT*, Sensores, Lógica Fuzzy, *Machine Learning* e *Belief Rule Base (BRB)*. Sendo que 50% dos artigos têm suas pesquisas concentradas nos temas de Sensores e *IoT*, representando respectivamente 27% e 23% (valores aproximados), conforme Figura 26.



**Figura 26.** Concentração dos temas

Fonte: Elaborado pela autora.

Desta RSL resultaram 2 subcategorias, quais sejam: Detecção e Lógica. De acordo com a literatura, as subcategorias e seus respectivos códigos serão apresentados na sequência, agregando a ponderação desta base teórica, com o conteúdo das entrevistas e dos documentos e estão representados na Figura 27.



**Figura 27.** Agrupamento de códigos e subcategorias de Tecnologias.

Fonte: Elaborado pela autora

O tema de Tecnologia foi mais apontado pela literatura do que pelos entrevistados, recebendo 12 citações nos conteúdos das entrevistas, as quais foram agrupadas nas codificações demonstradas na Figura 28.

| Código                              | Frequência | Categoria   | Subcategoria |
|-------------------------------------|------------|-------------|--------------|
| IoT                                 | 4          | TECNOLOGIAS | DETECÇÃO     |
| Sensores                            | 4          | TECNOLOGIAS | DETECÇÃO     |
| Câmeras                             | 2          | TECNOLOGIAS | DETECÇÃO     |
| Computação Móvel                    | 2          | TECNOLOGIAS | DETECÇÃO     |
| Belief Rule Base                    | 0          | TECNOLOGIAS | LÓGICA       |
| Lógica Fuzzy                        | 0          | TECNOLOGIAS | LÓGICA       |
| Machine Learning                    | 0          | TECNOLOGIAS | LÓGICA       |
| <b>Resultado: 7 de 33 Código(s)</b> |            |             |              |

**Figura 28.** Frequência das citações do tema Tecnologias.

Fonte: Elaborado pela autora com dados extraídos do Atlas.ti.

Pela análise da Figura 28, observa-se que os entrevistados se detiveram na subcategoria de detecção. É possível inferir que essa concentração nas alternativas de detecção se deve ao fato de que as tecnologias utilizadas nos algoritmos estão em desenvolvimento, emergindo nas pesquisas como alternativas de lógicas para a implementação dos semáforos inteligentes.

#### 4.3.5.1 DETECÇÃO

##### 4.3.5.1.1 Câmeras

Com relação às câmeras, os dados evidenciam que existem focos distintos na sua implementação. Serrano et al. (2005) utilizaram as câmeras e análise de imagens para agilizar a travessia de pedestres. O foco da pesquisa não é a otimização do tráfego, mas a segurança dos pedestres, em função da maior ocorrência de acidentes, principalmente na área de cruzamentos. Tal informação é inconsistente para a realidade de São Paulo, conforme apresentado pelo participante E4, que aponta 15% dos atropelamentos de pedestres na cidade acontecem nos cruzamentos. Segundo E4: “Um maior tempo de verde para o pedestre não significa o maior tempo de segurança. O tempo de verde tem que ser justo, atendendo pedestres e motoristas”.

Ainda relacionado à utilização de câmeras, dois estudos conduzidos respectivamente por Kanungo, Sharma e Singla (2014) e Kataria e Rani (2019), convergem no uso dos sistemas em tempo real com detecção de imagens para tornar a gestão do tráfego mais eficaz, minimizando com isso os congestionamentos. As imagens são capturadas e analisadas por meio de algoritmos de processamento de imagem para adequar a temporização dos semáforos à demanda em tempo real. No entanto, apesar do alinhamento conceitual relacionado à câmera, a pesquisa realizada por Kataria e Rani (2019), detecta a quantidade de veículos e dispõe de uma unidade de controle que pode gerar interrupções manuais, se necessário. Em contrapartida, o estudo de Kanungo, Sharma e Singla (2014) diverge do anterior, uma vez que a detecção é realizada pela densidade de veículos e não pela quantidade deles. Eles justificam este uso afirmando que utilizando a densidade, um caminhão conta como dois veículos, em função do espaço que ele ocupa.

E1 complementa enfatizando os cuidados relacionados ao uso de câmeras: “As câmeras pressupõem um ajuste bastante fino, para evitar que a detecção seja errada. Pior do que não detectar é detectar errado e gerar prejuízos (no tráfego)”.

#### 4.3.5.1.2 Sensores

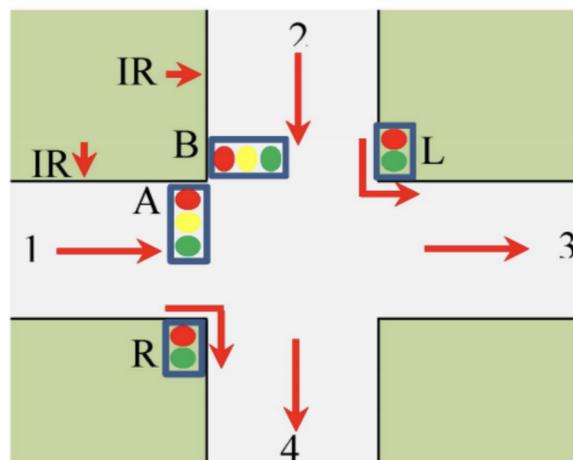
Segundo Palsa et al. (2019), os sensores são altamente precisos na detecção de veículos, desempenhando um papel importante no desenvolvimento de tecnologia inteligente e na melhoria e segurança do controle de tráfego. Este aspecto é aceito pelos entrevistados, que também mostram a confiabilidade na utilização dos sensores para detecção, mais especificamente os detectores tipo loop ou laço indutivo, como destacado pelo participante E4: “Os detectores indutivos são os mais eficientes. A perda de eficiência será sensível para o sistema que está tentando trabalhar no limite”. Esse tipo de sistema oferece alta precisão em termos de ocupação veicular, como salientam Lopes, Santos e Bastos (2016) no documento D2.

Palsa et al. (2019) trazem à tona a crescente expansão da tecnologia e as diferentes oportunidades que ela pode oferecer para os controles semafóricos, com distintas formas de detecção de veículos realizados nos cruzamentos por meio de câmeras e sensores, passando por *GPS* e radares a laser, assim como evidenciam a alternativa de potencializar os resultados obtidos quando utilizados em conjunto com pedestres e veículos, intercambiando informações. Os pesquisadores destacam a disponibilidade de vários tipos de sensores que podem ser utilizados aumentando a segurança de pedestres, detecção e alerta de fluxo irregular de tráfego. Em contrapartida, Guerrero, Zeadally e Contreras (2018) apontam que, apesar dos bons resultados operacionais obtidos com a implementação dos sensores, estes trazem como desvantagem, o alto custo de instalação, manutenção e regulação.

No documento D2, Lopes, Santos e Bastos (2016) reiteram que os sensores embutidos na camada superficial do pavimento, ficam expostos a situações que podem resultar no rompimento dos mesmos. Os entrevistados mostraram-se de acordo com este aspecto, porém como relata E2, esta situação pode ser mitigada: “Uma solução para isso, seria fazer um laço detector, com um berço de concreto (funcionou muito bem na avenida 9 de julho em São Paulo)”. Segundo colocado por E2, por mais de dez anos.

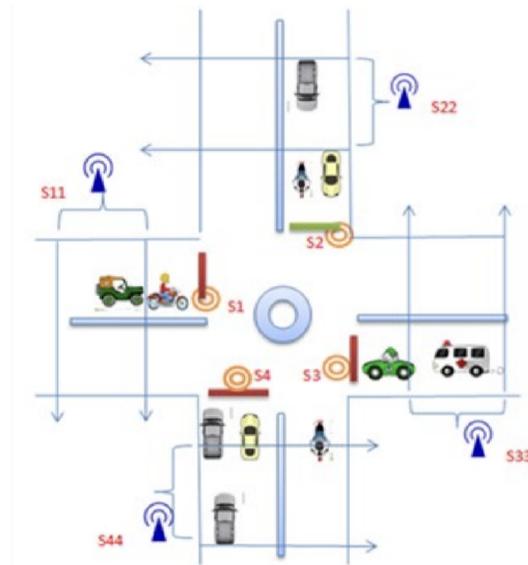
Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016); Manasi, Nishitha, Pratyusha e Ramesh (2020) apresentam soluções que utilizam os dados coletados pelos sensores para estender o tempo de verde quando houver um grande fluxo de veículos, se adaptando à

necessidade do tráfego. Ghazal et al. (2016) propõe em seu estudo um sistema de controle de semáforos inteligentes baseado num microcomputador que gerencia os semáforos de um cruzamento, monitorando o volume de tráfego e a densidade por meio de sensores infravermelhos (IR) instalados em ambos os lados das vias, como apresentado na Figura 29. Com base nessas informações, em tempo real, as temporizações são calculadas.



**Figura 29.** Modelo de intersecção (monodirecional) considerada no estudo  
Fonte: Ghazal, Elkhatib, Chahine e Kherfan (2016)

Manasi, Nishitha, Pratyusha e Ramesh (2020) apresentam uma solução que analisa se o tempo que um veículo demora para atravessar uma região predeterminada, excede o limite previamente definido, para então, alterar o tempo de verde do cruzamento. Para tanto, cada trecho da via, anterior ao cruzamento, é monitorado por um par de sensores de imagem, representados na Figura 30 por S11-S1, S22-S2, S33-S3 e S44-S4. Esses sensores capturam as fotos dos veículos em seu campo de visão a fim de calcular o tempo do percurso.



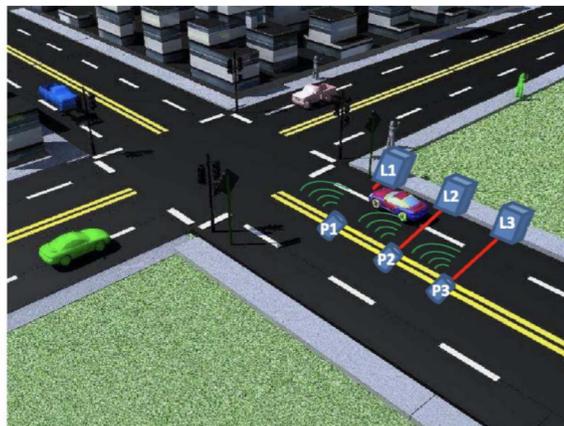
**Figura 30.** Modelo de intersecção (monodirecional) considerada no estudo  
 Fonte: Manasi, Nishitha, Pratyusha e Ramesh (2020)

Com isso, são tomados os tempos entre os sensores (por exemplo S11 e S1). Caso a diferença desses tempos exceder o limite estipulado para esse trecho de via, o controlador de tráfego altera a temporização de verde nesta via. Esta solução também identifica se o veículo é de emergência, concedendo prioridade na travessia do cruzamento.

Alaidi, Aljazeera, AlRikabi, Mahmood e Abed (2020) utilizam os sensores com uma proposta diferenciada, eles propuseram um sistema baseado na detecção de veículos a 30 metros do cruzamento, espaço suficiente para ser ocupado por uma quantidade de veículos que justifique o acionamento da luz verde no semáforo. Para isso, dois sensores infravermelhos, um de cada lado da via, conectados a um microcomputador, indicarão que o limite especificado de veículos foi alcançado, efetuando a alteração da luz verde do semáforo e permitindo a passagem dos veículos.

Nguyen, Tran e Huynh (2019) priorizam as motocicletas nas detecções de densidade de tráfego, em função do expressivo uso em alguns países. Neste caso a solução baseada em sensores foi adotada, pois as câmeras são pouco efetivas para as motocicletas. e, em função disso, a solução proposta pelo estudo se baseia em sensores. Como

apresentado na Figura 31, o projeto considera pares de transmissores (luz laser), representados pela letra L e receptores (sensores ópticos), representados pela letra P.



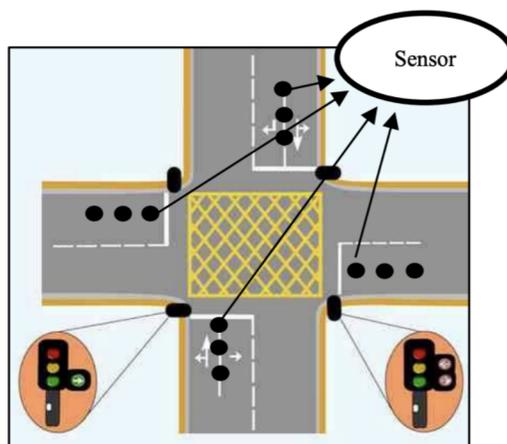
**Figura 31.** Proposta de configuração do Sensor

Fonte: Nguyen, Tran e Huynh (2019)

Alinhados, sensores (P) e luz laser (L), criam uma conexão virtual, representada na Figura 31 pela linha vermelha. Essas conexões permitem a detecção de veículos e motocicletas, assim como determinam a situação do tráfego, de normal (sem conexões estabelecidas) a tráfego extremamente congestionado (conexões estabelecidas até P3-L3).

Esta solução não se aplicaria ao Brasil, pois as motocicletas não contribuem para formação de filas, uma vez que, segundo a legislação, a circulação de motocicletas entre as faixas veiculares não é proibida aqui, conforme o documento D2 (Lopes, Santos & Bastos, 2016).

Nor, Zaman e Mubdi (2017) trazem uma solução para detectar a presença de pequenos veículos como motocicletas e bicicletas, por meio de vários sensores, conforme a Figura 32. Segundo os autores, o sistema utilizando um único sensor não é eficiente porque em horário de pico só indicará a presença de um veículo. Os dados lidos pelos sensores são transmitidos via Wi-Fi para armazenamento e processamento do algoritmo em nuvem que identificará as vias com maior número de veículos e que, portanto, necessitam de mais tempo de verde.

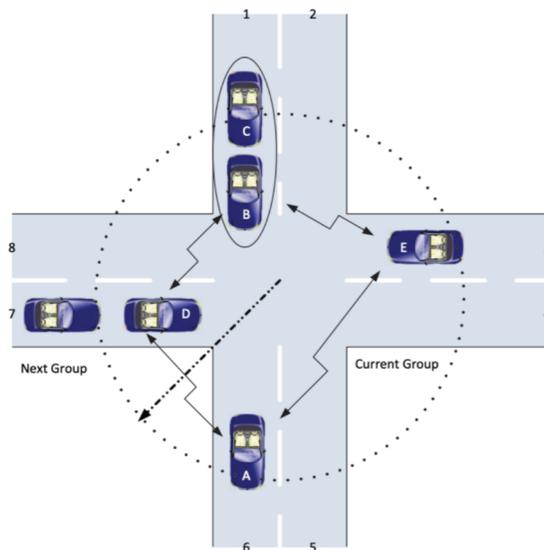


**Figura 32.** Modelo de instalação de múltiplos sensores considerados no estudo  
 Fonte: Nor, Zaman e Mubdi (2017)

#### 4.3.5.1.3 Computação móvel

Munst et al. (2015) avaliaram tecnologias inovadoras no campo da comunicação, ciência da informação e posicionamento para estudar um sistema de controle de tráfego altamente automatizado, considerando sobretudo as informações do comportamento do tráfego. O sistema não utiliza sensores nos cruzamentos, ele considera veículos autônomos e semiautônomos e utiliza redes móveis e tecnologia de posicionamento, trocando informações bidirecionais entre veículos e infraestrutura. Isso permitirá que um cruzamento de tráfego inteligente, com semáforos virtuais, tenha controladores de gerenciamento de tráfego em nuvem que recebe e processa os dados dos veículos (localização geográfica, velocidade, direção) e devolve mensagens de recomendação para os veículos, resolvendo conflitos e definindo a velocidade.

Como pré-requisito para garantir a segurança nos cruzamentos, a comunicação e o posicionamento devem ser extremamente precisos e redundantes, pois como apresentado na Figura 33, os veículos colaboram e compartilham informações entre eles para seu adequado funcionamento.



**Figura 33.** Modelo de intersecção considerado no estudo

Fonte: Munst et al. (2015)

Os aspectos relacionados aos veículos autônomos são enfatizados por E1: “Com a operação dos veículos autônomos, o veículo passa a ser o próprio detector, não precisando dar manutenção, com uma detecção muito mais precisa”.

Ameddah, Das e Almhana (2018) e Al-qutwani e Wang (2019) indicam como solução para o sistema de semáforo inteligente, a rede veicular *ad hoc* (*VANET*). No entanto, Ameddah, Das e Almhana (2018) utilizam a *VANET* para conceder passagem pela intersecção aos veículos de maior prioridade. Al-qutwani e Wang (2019) utilizam as redes *VANET* para gerenciar o tráfego do cruzamento, uma nova arquitetura baseada em nome do conteúdo chamada rede de dados nomeados (*NDN*). A solução substitui os sistemas convencionais por um sistema digital inteligente. Com isso, os semáforos físicos nos cruzamentos são substituídos por semáforos virtuais que funcionam em conjunto com uma unidade de processamento localizada ao lado da estrada, coletando os pedidos dos veículos para atravessar o cruzamento. Após o processamento destes pedidos, envia uma mensagem de resposta para cada um dos veículos aprovando ou rejeitando o pedido de passagem. Esta solução é adequada para veículos autônomos e, segundo os pesquisadores, se mostrou eficiente para o tráfego.

Alkhatib e Sawalha (2020) focaram no desenvolvimento de semáforos virtuais (em inglês *VTL*), aproveitando a era das cidades inteligentes, *IoT*, modelos de

comunicação de veículos com tudo (em inglês *V2X*), isto é, permitindo aos veículos se comunicarem uns com os outros e com as infraestruturas inteligentes. Segundo os pesquisadores, *VTL* é a principal tendência de otimização de tráfego, utilizando as diferentes opções existentes: a. Veículo para Veículo (em inglês *V2V*); b. Veículo para a rede (em inglês *V2N*); c. Veículo para infraestrutura (em inglês *V2I*).

A tecnologia *V2V*, representada na Figura 34, dispensa a infraestrutura nos cruzamentos, os veículos se comunicam entre si, e um deles, chamado de líder, gerencia os demais.

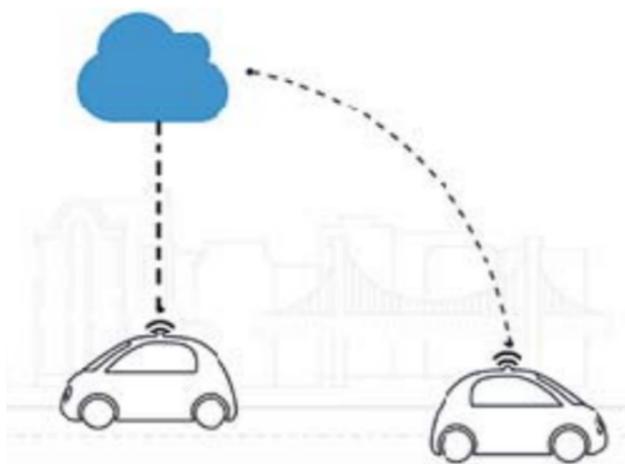


**Figura 34.** Veículo para veículo (*V2V*)

Fonte: Alkhatib e Sawalha (2020)

Observa-se na Figura 34 a ausência de infraestrutura, suprida pela comunicação realizada entre os veículos que se encontram no cruzamento.

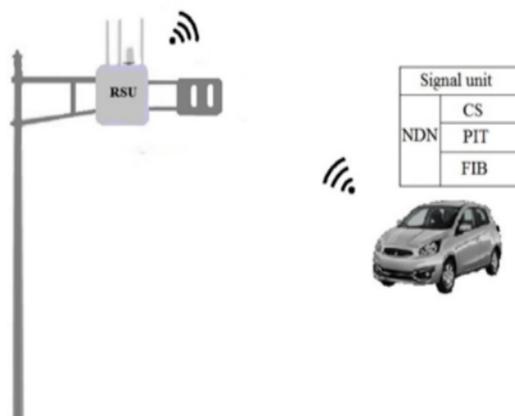
A Figura 35 ilustra a comunicação do *V2N*, nesta opção os veículos enviam dados para processamento em nuvem que retornam para o controlador de tráfego.



**Figura 35.** Veículo para rede (*V2N*)

Fonte: Alkhatib e Sawalha (2020)

Por fim na opção *V2I*, representada na Figura 36, os dados são coletados por equipamentos que se encontram na via e se comportam como um controlador de tráfego.



**Figura 36.** Veículo para infraestrutura (*V2I*)

Fonte: Alkhatib e Sawalha (2020)

Como observado na Figura 36, os equipamentos que se encontram na via processam e retornam a informação para cada veículo do cruzamento.

O interesse por esta tecnologia, também é apresentado por E1:

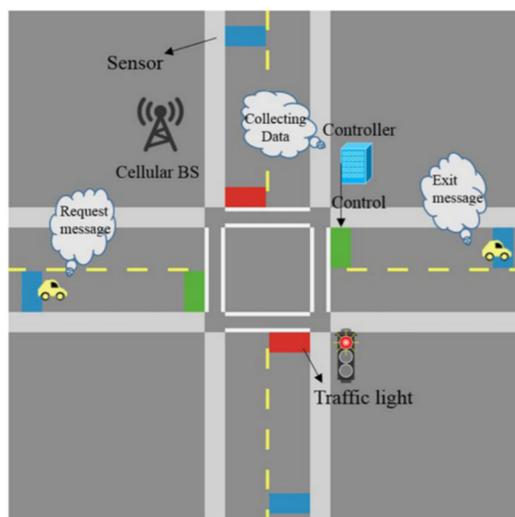
“Com o *V2X* o sistema vai ser muito mais preciso porque vai saber a trajetória e a posição do carro a cada segundo, não vai ter mais ponto cego. Não existe mais zona de detecção, toda a aproximação vai ser zona de detecção”.

#### 4.3.5.1.4 Internet das Coisas

Segundo Mocnej, Seah, Pekár e Zolotová (2018), *IoT* é um paradigma altamente discutido, voltado para conectar dispositivos do dia a dia à Internet. *IoT* fortalece os sistemas tendo a capacidade de controlar e sentir o ambiente ao nosso redor. Esse aspecto também é apontado por E3, como uma alternativa para identificar perturbações no tráfego.

Miz e Hahanov (2014) enfatizam a efetividade no uso de *IoT* e *Big Data* no processamento e análise de grandes quantidades de dados capturados por sensores em tempo real. Os semáforos inteligentes integrados à *IoT* possibilitam maior eficiência nas vias e na gestão do tráfego, com a análise constante dos dados obtidos dos veículos, sensores rodoviários e dados de usuários. O participante E1 identifica uma oportunidade na utilização de *IoT* para conceder prioridade para veículos de emergência: “Uma aplicação viável para o uso de *IoT* são os veículos de emergência, para dar uma rota prioritária”.

Bui, Jung e Camacho (2017) enfatizam a importância nos dispositivos *IoT* e os fluxos de dados gerados por eles, na análise em tempo real, propiciando uma melhor tomada de decisão. Buscando minimizar o tempo de espera nos cruzamentos, veículos conectados ou sensores localizados nas estradas, coletam informações em tempo real e, com base nos dados transmitidos pelos veículos conectados, são executados algoritmos para melhorar o fluxo de tráfego aplicando a teoria dos jogos. Para tanto, como representado na Figura 37, sensores identificam o movimento dos veículos em direção a intersecção, uma estação celular realiza a comunicação entre veículos e controlador e este decide o tempo de verde que será dado para aquela intersecção, a partir da densidade de veículos. Adicionalmente, o sistema agiliza a passagem de veículos prioritários pela distinção entre os tipos de veículos.



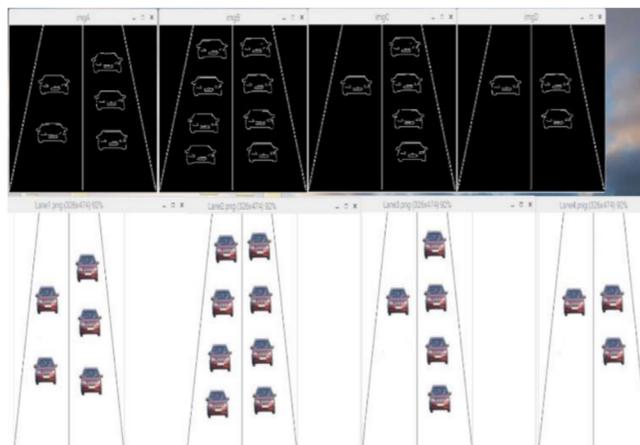
**Figura 37.** Arquiteturas de objetos conectados ao tráfego

Fonte: Bui, Jung e Camacho (2017)

El Hassak e Addaim (2019) apresentam uma solução integrando *IoT*, *Big Data*, *Machine Learning* e *Closed Circuit TeleVision (CCTV)* para a otimização dos sistemas de gerenciamento de tráfego. A associação das técnicas de *IoT* e *Big Data*, segundo os pesquisadores, tem se mostrado bastante efetiva, pois os dados coletados sobre os níveis de tráfego em tempo real são volumosos e o *Big Data* possui técnicas para organizar, classificar e processar grandes volumes de dados, possibilitando a tomada de decisão para melhoria do fluxo de tráfego dos veículos. Os dados são coletados por dois sensores colocados nas vias, que determinam o número de veículos, além de outros sensores (*IoT*) e semáforos. O processamento desses dados é realizado e novos parâmetros de configuração de luzes são enviados para o controlador de tráfego.

Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019) apontam um método de controle de semáforo usando *IoT* e processamento de imagem e vídeo coletados das vias. A programação dos semáforos, determinando o tempo de verde, é executada por dois modelos distintos, utilizando a demanda de veículos e o número de veículos. O modelo que utiliza exclusivamente a demanda de veículos se baseia nas imagens capturadas de todas as direções das vias, das condições de tráfego em cada cruzamento, como representado na Figura 38. O processamento das imagens é realizado comparando as

imagens entre si e identificando o percentual de sobreposição entre elas, permitindo determinar dinamicamente maior tempo de verde.



**Figura 38.** Procedimento de avaliação da demanda de veículos

Fonte: Adaptado de Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019) pela autora.

A solução que utiliza a densidade e o número de veículos, faz uso de um vídeo ao vivo que captura as imagens por uma câmera e as processa, determinando o número de veículos que se aproxima do cruzamento, permitindo o cálculo de melhor temporização para o semáforo.

Frank, Khamis Al Aamri e Zayegh (2019), a exemplo da solução apresentada por Razavi, Hamidkhani e Sadeghi (2019), utilizam *IoT* para monitorar e controlar o tráfego, determinando a densidade de tráfego usando vídeo e processamento de imagens em tempo real. A imagem capturada em tempo real pela câmera que fica no cruzamento é comparada com uma imagem de referência com a via sem veículos, conforme apresentado na Figura 39. A densidade de tráfego é maior quanto maiores forem as diferenças dessa comparação, permitindo com estes dados determinar os tempos dos sinais de tráfego.



**Figura 39.** Procedimento de avaliação da demanda de veículos  
 Fonte: Adaptado de Frank, Khamis Al Aamri e Zayegh (2019) pela autora.

#### 4.3.5.2 LÓGICA

##### 4.3.5.2.1 Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy (em inglês *FL*) tem sido bastante utilizada para tomada de decisão em diversas áreas de pesquisa como drones, manobras náuticas, controle de iluminação, e se mostra particularmente promissora no controle do tráfego em metrópoles (Hartanti, Aziza & Siswipraptini, 2019)

Sangster, Persad e Duncan (2009) destacam *FL* para controlar os tempos de verde dos semáforos. Para tanto, consideram o comprimento de cada uma das filas de veículos represados no cruzamento e o número de veículos que saem do cruzamento durante o sinal verde para tomada de decisão. Baseado nessas informações, o sistema decide por aumentar ou diminuir o tempo de verde nas faixas de tráfego, dependendo do congestionamento detectado e da prioridade definida.

Hartanti, Aziza e Siswipraptini (2019) agregam as informações consideradas por Sangster, Persad e Duncan (2009) à velocidade dos veículos e à largura da pista para otimização do tráfego. O tempo de verde concedido para o semáforo será calculado considerando esses parâmetros.

##### 4.3.5.2.2 Machine Learning

Natafqi, Osman, Haidar e Hamandi (2019) trazem em seu estudo um sistema de semáforo adaptativo com rede neural, utilizando aprendizagem por reforço. Para tanto, sensores ultrassônicos são instalados nas vias para detectar a passagem dos veículos e os

controladores utilizam esses dados para calcular o número de veículos, os comprimentos de fila e os tempos de fila. Com base nesses dados os tempos de verde serão calculados e atualizados no controle semafórico.

El Hassak e Addaim (2019) agregam a solução utilizando *IoT*, já apresentada, algoritmos de Machine Learning que processam e analisam as imagens coletadas pelas câmeras para determinar a ocorrência de acidentes, informando aos agentes para tomada de decisão.

#### 4.3.5.2.3 Belief Rule Base

Para Lin, Li, Chen, Fu e Chi (2016), os semáforos inteligentes combinam a tecnologia existente com inteligência artificial para definir tempos de verde para os semáforos. Tendo como objetivo a redução do tempo de espera do veículo e a redução do congestionamento do tráfego, a estratégia proposta no estudo se baseia na prioridade e no fluxo de tráfego previsto que é obtido do *Belief Rule Base (BRB)*. Em função da precisão do seu raciocínio, esse sistema pode prever o fluxo futuro baseado em dados históricos do tráfego. Nesse sentido, o fluxo considera o tráfego em tempo real no momento anterior e o fluxo previsto neste momento, baseado em *BRB* e tem menores tempos de espera se comparados com os semáforos a tempo fixo em aproximadamente 46%.

## 4.4 APRENDIZADOS E PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Esta seção destina-se a sintetizar os aprendizados e a propor soluções que vão ao encontro das necessidades e demandas da cidade de São Paulo por tecnologias de controle semafórico, objetivando reestabelecer um sistema mais robusto e eficiente, atendendo a carência atualmente apresentada pela cidade. Essa análise se baseará no resultado das discussões apresentadas nas seções que a precederam, por meio do confronto da literatura com as entrevistas e documentos.

Primeiramente, a análise de dados evidencia o fundamental papel que o planejamento urbano exerce nas questões de mobilidade, por meio do uso e ocupação do solo, uma vez que à medida que as infraestruturas (banco, comércio, universidades, empresas, áreas de convívio) se encontram concentradas em determinadas regiões, surge

a necessidade de deslocamentos, muitas vezes longos, causando inevitáveis congestionamentos e as consequências geradas por eles. Com as subcentralidades existe uma menor necessidade deste deslocamento e um uso e ocupação do solo mais inteligentes. Adicionalmente, as subcentralidades permitem uma otimização regional, definidas de acordo com as necessidades do local. Esta compreensão levaria a um planejamento mais amplo contemplando as necessidades neste setor.

Em segundo lugar, porém alinhado com o planejamento urbano, a análise aponta para a importância de um Plano de Semáforos orientado pelas ações de mobilidade, permitindo traçar planos e estratégias a longo prazo para serem cumpridas, dentro de um cronograma maior de mobilidade e não se restringindo a um único plano de governo. Neste caso é fundamental o envolvimento dos atores necessários à boa execução do plano, tendo como prioridade central o semáforo inteligente, em função dos recursos indispensáveis para a sua implementação, pelo esforço a ser despendido, mas, principalmente, pelo alto retorno que sua utilização trará. Com isso, estariam contempladas todas as prioridades definidas para a cidade, quais sejam transporte coletivo, automóveis, bicicletas, pedestres, entre outros; bem como as regiões com situação mais crítica de serem atendidas. Importante destacar a relevância de estabelecer uma política de aprimoramento e de evolução constante deste quadro, ao invés de pensar como um único projeto com início, meio e fim.

A centralização do controle semafórico também se apresenta como uma alternativa que possibilita muitos ganhos, por ser economicamente viável e dar um retorno bastante significativo. Isso poderia ser priorizado antes mesmo de realizar grandes projetos e efetuar grandes investimentos, pois convive harmoniosamente com qualquer solução tecnológica que se implemente. Com a centralização é possível realizar ajustes mais dinâmicos, mesmo que utilizando os semáforos em tempo fixo, pela capacidade de responder e ajustar frente a um determinado evento, compensando a perda gerada. A centralização poderia ser utilizada tanto para reconhecimento de falhas, como pela própria operação, propiciando a carga de planos de tráfego a distância, programação, monitoramento, inibindo, por exemplo, os erros que ocorrem quando a equipe de manutenção vai a campo e digita os planos pelo *keyboard* ou quando é necessária a carga de um plano especial em função de algum evento pontual.

Adicionalmente, a manutenção foi um aspecto considerado pela literatura e pelos entrevistados como um ponto de extrema relevância. Destacada, tanto nas entrevistas, quanto nos documentos analisados, esta questão tratou-se de um dos grandes responsáveis pelo desuso dos semáforos inteligentes implementados em São Paulo. Por se tratar de uma tecnologia que requer uma infraestrutura robusta, a qual tem como pré-requisito para o seu bom desempenho, o acurado funcionamento dos equipamentos e sistemas que a compõem, além de uma programação bastante trabalhosa, a sua manutenção, contínua e, sobretudo, preventiva é crucial para garantir a continuidade da operação e os consequentes benefícios almejados. Os entrevistados foram bastante enfáticos em dizer que a disciplina em manter o sistema e a infraestrutura é fundamental para preservar o investimento realizado com a tecnologia implementada. “Se não tiver verba para manter, melhor nem implantar”, dizem eles. Se houver uma manutenção preventiva efetiva, a corretiva ficará minimizada, tornando-se uma necessidade eventual. Alguns sistemas já oferecem ferramentas para avaliar o desempenho dos laços, permitindo identificar queda de rendimento e agir preventivamente. Quando esta funcionalidade não está disponível, as vistorias de maneira visual, analisando o laço e as emendas da fibra óptica, também atendem, desde que sejam frequentes.

Outro ponto que se apresenta fundamental para um projeto desse porte é a garantia de que o mesmo seja realizado de maneira criteriosa e com as melhores práticas adotadas por um escritório de projetos. Com todas as etapas realizadas, desde a iniciação até o encerramento, gerando os respectivos entregáveis necessários ao bom andamento do projeto. Contudo, não se justificaria descrever aqui as etapas exigidas numa gerência de projetos, porém em função da experiência vivenciada na década de 1990, quando houve o projeto de Semáforos Inteligentes, pelos problemas encontrados na gestão deste projeto, justifica-se destacar alguns pontos a serem observados:

Primeiro, na fase de iniciação, deve-se avaliar criteriosamente o mapeamento e justificativa de viabilidade do projeto, priorizando os maiores investimentos, no caso os relacionados à implementação de semáforos inteligentes, nas regiões onde realmente ele se faz necessário, denominadas regiões críticas e saturadas. Nessa fase, para garantir a continuidade do projeto com sucesso, deverão ser previstos os recursos e requisitos necessários à implantação do projeto, assim como os recursos para a operação e

manutenção. Deverão também ser definidas as partes envolvidas e suas respectivas responsabilidades no projeto e na fase operacional do mesmo.

Na fase de planejamento, o destaque seria na elaboração de um plano factível de implementação, sincronizando todos os atores e *stakeholders* necessários para a estruturação de um plano consistente e realista para a implantação do projeto, com cronogramas alinhados à realidade e ao investimento empenhado no projeto. Além disso, se faz necessário o envolvimento dos recursos indispensáveis ao bom andamento do projeto, considerando recursos humanos, técnicos, administrativos, financeiros e de operação desde o início do mesmo, bem como os itens técnicos e de infraestrutura, os quais necessitam de manutenção na fase de operação do projeto.

Nessa fase de operação, também deverá ser considerada a capacitação e transferência de *know how* para a equipe de operação e manutenção, a partir da documentação da implantação gerada, base para quando o projeto for entregue. A CET conta com recursos humanos com excelente capacitação técnica e *background* indispensáveis para um projeto desta magnitude, sendo de suma importância a participação desta Companhia para assumir internamente as atividades e/ou para a transferência de conhecimento para equipes terceirizadas. A reavaliação de estruturas internas, que possam comportar os desafios desta implementação, também deve ser considerada.

Na fase de execução, dedicar atenção especial aos prazos, escopo, custos e qualidade definidos, bem como ao sincronismo das obras físicas com a instalação das redes e controladores de tráfego por área, garantindo com isso que as áreas sejam entregues de maneira integral, possibilitando o início da operação.

Na fase de monitoramento e controle, deverão estar contempladas todas as revisões e simulações que assegurarão o melhor rendimento em cada um dos cruzamentos, assim como a alocação dos recursos para garantir a correta programação dos semáforos durante a fase de implantação do projeto. O monitoramento do projeto deverá ser integral e frequente, fazendo com que os ajustes, quando necessários, sejam ágeis, sem comprometer o andamento do projeto.

Por fim, na fase de encerramento, devem ser identificados os pontos fortes e fracos, além de oportunidades de melhorias. Isto se faz ainda mais relevante à medida que a sugestão é de que o projeto seja conduzido em pequenas áreas, possibilitando assim resultados a curto prazo e a oportunidade de melhoria contínua. Além disso, os contratos que foram finalizados com a implantação, devem ser formalmente encerrados e os contratos, que contemplem cláusulas de garantia e/ou manutenção, que seguirão vigentes, deverão ser transferidos para a área operacional, garantindo com isso um adequado início da operação.

De maneira complementar, o plano de negócios deve ser pensado como um investimento a longo prazo, com uma visão ampla que garantirá não somente a fase do projeto de implementação, mas a garantia da continuidade da operação, com as respectivas manutenções de infraestrutura e de sistema, capacitação da equipe e evolução da tecnologia. Sem isto, o projeto não terá sucesso. Importante salientar que as decisões de um projeto dessa envergadura não se restringem exclusivamente ao escopo técnico, mas também a uma questão política e econômica, nas quais serão escolhidas as tecnologias que melhor retorno darão dentro das características das regiões e do orçamento que se dispõe.

Por fim, a escolha da solução e das tecnologias que serão utilizadas são parte central do desafio desta implementação. Nesse caso, a análise de dados evidencia uma diversidade de novas tecnologias disponíveis que vem sendo implementadas ao redor do mundo, em termos de detecção, comunicação ou lógica. Assim, a escolha da solução para São Paulo deve se dar por meio de uma análise criteriosa, considerando a diversidade de regiões presentes e suas respectivas características, optando pela alternativa mais adequada à realidade local. A questão econômica também tem um peso bastante grande nessa decisão, uma vez que os investimentos são expressivos e devem acontecer em regiões onde haverá retorno. Nesse sentido, a solução híbrida, combinando diferentes soluções e diferentes tecnologias, se mostra a mais interessante. Essa alternância pode se dar na tecnologia ou na forma de detecção, mesmo que utilizando da mesma tecnologia.

Analisando a cidade de São Paulo, as entrevistas com especialistas, assim como as fontes pesquisadas, a proposta desta pesquisa é a de combinar alternativas e soluções tecnológicas, avaliando a necessidade apresentada em cada local, bem como realizando

uma análise de benefício/custo que atenda ao investimento planejado e ao retorno esperado. Conforme destacado no presente estudo, a solução de semáforos inteligentes ou em tempo real é a mais custosa no que se refere a implementação e manutenção, no entanto, é a que traz melhores resultados e a que consegue responder a contento à situação de tráfego saturado, onde um ajuste de segundos na temporização faz diferença na qualidade do tráfego. Com isso, diferentemente do que foi sugerido no PlanMob/SP (2015), os semáforos inteligentes deverão ser implantados numa quantidade mais reduzida, num conjunto menor de cruzamentos, e não nos 3000, como consta no referido plano.

O sistema em tempo real é muito mais eficiente e recomendável para os lugares onde eles realmente se mostram como alternativa capaz de atender ao sistema principal da cidade, possibilitando extrair o máximo de rendimento possível. Nesse caso, a referência é o sistema em tempo real que otimiza o tempo de verde no próprio estágio, não no estágio seguinte. Esse é um dos grandes ganhos do tempo real, tratar a aleatoriedade do tráfego no momento em que ela está acontecendo.

Uma vez justificada a escolha para os semáforos em tempo real, a detecção desempenha papel fundamental nesta tecnologia. A escolha da solução a ser utilizada deve considerar vários aspectos: para os lugares mais críticos e para grandes corredores, os laços indutivos instalados com alta qualidade em berço de concreto são a melhor opção, onde se requeiram detecções mais precisas e menos manutenções se façam necessárias. Outro ponto a ser considerado nestas implementações refere-se à quantidade de detectores necessários em um cruzamento; devendo ser observado se eles realmente são necessários ou se eles poderão utilizar a detecção da aproximação mais carregada, ou trabalhar com os laços vizinhos e usar outro tipo de tecnologia, por exemplo em tempo fixo.

Os semáforos atuados isolados também poderão ser instalados em outros cruzamentos em que possam existir variabilidades que justifiquem esta implementação, em regiões mais isoladas, onde não seja necessário trabalhar em rede. Nesse caso eles são mais efetivos, pois não será necessário obedecer a algumas situações de contorno, como acontece com o semáforo em tempo real. Para os sistemas não saturados, onde não existe demanda suficiente para receber a solução em tempo real, o sistema em tempo fixo se

mostra uma excelente alternativa, uma relação benefício/custo bastante vantajosa. Para que se alcance esse resultado, deve estar centralizado, com uma programação bastante ajustada e uma manutenção constante dos planos.

Entretanto, a RSL mostrou algumas tecnologias que poderão colocar as soluções de controles semafóricos em outro patamar de qualidade. Algumas delas já estão disponíveis no Brasil e poderão constar do arcabouço que se disponibilizará para atender os problemas de mobilidade urbana. *IoT*, *GPS*, diversos aplicativos que poderão fornecer dados como Waze, Google Maps, Moovit, disponibilizando informações da fluidez do tráfego, além de movimentos com determinada característica, ajudarão a compor uma rica Base de Dados armazenada em nuvem. Tais tecnologias podem se apresentar como uma solução viável para regiões não saturadas, utilizando os dados, tanto para o momento atual, quanto para análises futuras de comportamento do tráfego. Outras tecnologias disponíveis na literatura ainda não estão plenamente disponíveis no Brasil, mas apontam para um futuro promissor.

Com esse cenário, torna-se premente avaliar quais investimentos se justificam fazer agora, e quais seriam interessantes reavaliar e postergar sua implementação ou optar por uma solução transitória. Algumas dessas tecnologias poderão mudar radicalmente a maneira como alguns sistemas irão funcionar, mas especificamente no que se refere aos controles semafóricos, o advento do 5G, fundamental para um futuro em que tudo estará conectado, geraria uma mudança radical na comunicação entre os equipamentos de campo com as centrais de controle. Nesse caso, dispensaria o uso de cabos metálicos ou de fibra óptica na comunicação dos controladores com a central, assim como os custos de infraestrutura dos cabos e sua respectiva manutenção. Em contrapartida, um cuidado especial deverá ser tomado para garantir que haja antenas e infraestrutura suficientes e em sistemas redundantes para manter a operação do 5G sem falhas, pois a falta de sinal impactaria diretamente o tráfego. Num futuro ainda mais distante, pode-se falar de veículos autônomos e comunicação *V2X*. Com esta tecnologia, os detectores poderiam ser dispensados, pois cada veículo funcionaria como um detector, fornecendo o posicionamento do veículo 100% do tempo, diferentemente dos laços ou das câmeras que percebem o veículo somente quando estes passam pela área de detecção.

As tecnologias vêm ajudando e continuarão colaborando de maneira expressiva com a questão do tráfego. No entanto, é preciso implementar as soluções paulatinamente, mas de maneira constante, garantindo manutenção preventiva e incorporando benefícios aos pedestres e aos transportes coletivos de modo coerente e necessário.

Com o objetivo de consolidar e sintetizar as propostas prioritárias, assim como os resultados esperados de suas respectivas implementações, foi utilizada a Tabela 11.

**Tabela 11**

Propostas prioritárias

| Sugestões prioritárias  | Principais resultados   |
|---|---|
| Definição de ações inteligentes no uso e ocupação do solo no processo de Planejamento Urbano          | Menores necessidades de deslocamentos com a implantação das subcentralidades  |
| Elaboração de Plano Diretor de Semáforos, alinhado ao Plano de Mobilidade Urbana                      | Planos e estratégias a longo prazo, extrapolando um único plano de governo  |
| Centralização do controle semafórico  | Ajustes e reconhecimento de falhas de maneira mais dinâmica   |
| Manutenção constante e preventiva dos sistemas e dos componentes dos quais ele depende para funcionar | Preservação dos investimentos realizados com a implementação da tecnologia  |
| Adoção de práticas de escritório de projetos  | Geração dos entregáveis necessários ao bom andamento do projeto, contemplando desde a etapa de iniciação até a de encerramento do projeto |
| Escolha da solução e tecnologia de maneira criteriosa   | Obtenção do resultado mais adequado a realidade local, por meio de uma solução híbrida, combinando diferentes soluções e tecnologias      |

Fonte: Elaborado pela autora.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de controle semafórico estão sendo vistos pela literatura como uma alternativa para colaborar com os problemas gerados pela mobilidade urbana, especificamente os relacionados a congestionamentos e segurança no trânsito. A RSL, realizada no âmbito deste estudo, permitiu dar visibilidade às novas tecnologias de sistemas de controle semafórico em tempo real, que estão sendo avaliadas no mundo, para contribuir com o desafio do tráfego, principalmente nas cidades urbanizadas. Os temas que emergiram da literatura foram as motivações para a implementação dos semáforos inteligentes, os benefícios oriundos dessa implementação, as barreiras e dificuldades encontradas com essa implantação, assim como as tecnologias que podem ser escolhidas para esse fim. Estes temas identificados pela RSL foram abordados pelos participantes entrevistados, que contribuíram para a análise, a partir de suas visões a respeito da cidade de São Paulo, no que concerne à implantação do sistema em tempo real na segunda parte da década de 1990 e ao seu desuso.

Os resultados desta análise permitem identificar a similaridade entre a literatura e a visão dos entrevistados no que se refere às motivações e aos benefícios gerados por essa implementação, destacando os de ordem Socioambientais, bem como os ligados à Diminuição de Atrasos, Melhoria na Segurança e Concessão de Prioridades, seja para transportes coletivos, pedestres ou veículos de emergência.

Além de corroborar a literatura analisada, a experiência dos entrevistados foi bastante valiosa, à medida que deu visibilidade às principais barreiras encontradas na implementação do sistema em São Paulo, possibilitando com isso, evidenciar temas que merecem cuidado redobrado quando for efetuado um novo projeto como este, numa cidade com as dimensões e características que um importante centro urbano como São Paulo tem.

Com base na análise do conteúdo das entrevistas e dos documentos consultados, os resultados apontaram que o sistema em tempo real requer um trabalho metódico, no que diz respeito aos detalhes e ajustes da implementação, e um cuidado especial com as fases de operação e manutenção. No que diz respeito a esta última, pode-se afirmar que a manutenção preventiva e contínua de todos os componentes é necessária para garantir os

sistemas semafóricos inteligentes e se destacou como o maior responsável pelo desuso dos semáforos em tempo real na cidade de São Paulo.

Os resultados deste estudo ofereceram subsídios para a proposição de sugestões de como poderia ser conduzido um novo projeto de controle semafórico na cidade de São Paulo. A primeira proposição refere-se ao controle centralizado, permitindo melhor monitoramento das vias e dos equipamentos, assim como ajustes mais dinâmicos. A segunda refere-se à elaboração de um Plano Diretor de Semáforos, como parte do plano de mobilidade urbana da cidade, podendo servir de base para o planejamento de ações a longo prazo, aumentando a possibilidade de sobrevivência do sistema perante as frequentes mudanças de gestão.

A terceira proposição, de fundamental importância, trata-se da escolha criteriosa da tecnologia a ser utilizada em diferentes regiões da cidade, respaldada pela literatura e pelo conteúdo das entrevistas, uma vez que se pode observar uma ampla oferta de tecnologias, adequadas para atender a realidades específicas. Com isso, em termos de escolha de tecnologia, a proposta é a de utilizar de uma combinação de soluções distintas, cada qual atendendo às necessidades encontrada em cada ponto específico da área urbana. Semáforos em tempo real para regiões saturadas e locais mais críticos, semáforos atuados em lugares mais isolados, mas que a adaptabilidade seja importante, tempo fixo em regiões onde a variabilidade não é tão impactante, porém convivendo com essas outras tecnologias mais sofisticadas. Além disso, devem ser implementadas alternativas que melhorem a convivência dos pedestres no tráfego, fornecendo a eles maior segurança e agilidade nas travessias de vias.

A quarta contribuição, ainda focada na oferta de soluções tecnológicas, está relacionada à combinação de fornecedores de solução, permitindo uma aproximação da academia, para que novos estudos possam ser considerados, além da possibilidade de desenvolvimento de novos produtos por *startups* e empresas nacionais, desde que bem direcionadas por equipes técnicas experientes e conhecedoras das alternativas tecnológicas possíveis de atender à demanda da cidade. Por fim a quinta proposição refere-se ao gerenciamento de um projeto por um escritório de projetos, garantindo com isso que todas as etapas necessárias para o atingimento do objetivo específico sejam cumpridas, dentro do escopo, tempo e custos definidos, com qualidade.

Como sugestão de pesquisas futuras aponto o fator comportamental não abordado neste estudo, mas relevante, pois o ser humano está imerso no trânsito, seja como motorista de veículo coletivo ou individual, seja como pedestre.

## REFERÊNCIAS

- Ager, P. G. (2014). Os Benefícios da Operação de Semáforos em Tempo Real <http://www.cetsp.com.br/media/372177/nt%20236.pdf>.
- Alaidi A. H. M., Aljazaery I. A., AlRikabi H. T. S., Mahmood I. N. & Abed F. T. (2020). Design and implementation of a smart traffic light management system controlled wirelessly by Arduino. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, 14(7).
- Alkhatib, A. A. A. & Sawalha, T. (2020). Techniques for road traffic optimization: An overview- *Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE)*, 11(4), 211-320.
- Al-qutwani M. & Wang X. (2019). Smart traffic lights over vehicular named data networking. *Information* 10(83). doi:10.3390/info10030083, 2019.
- Ameddah M. A., Das B. & Almhana J. (2018). Priority based Algorithm for Traffic Intersections Streaming Using VANET. *14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. doi:10.1109/iwcmc.2018.8450287, 2018.
- Anelli, R. (2007). Redes de mobilidade e urbanismo em São Paulo: das radiais/perimetrais do Plano de Avenidas à malha direcional. *Arquitetextos*, 082.00(7).
- Araújo, G. (2018). Paulistano demora quase 3 horas por dia no trânsito, e 88% dos pedestres se sentem inseguros, diz pesquisa. Recuperado em 10 abril, 2020, de <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/09/18/paulistano-demora-quase-3-horas-por-dia-no-transito-e-88-dos-pedestres-se-sentem-inseguros-diz-pesquisa.ghtml>.

Banco Mundial. (2003). *Cidades em Movimento: Estratégia de Transporte Urbano do Banco Mundial*. São Paulo: Sumatra Editorial.

Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo: Laurence Bardin*. São Paulo: Edições, 70.

Bardin, L. (2016). *Análise de conteúdo: Laurence Bardin*. São Paulo: Edições, 70.

BBC News. (2019). *A inteligência artificial pode acabar com os engarrafamentos?* Recuperado em 10 abril, 2020, de <https://www.bbc.com/portuguese/vert-fut-46895407>.

Benedet, R. (2015). *O Desafio da Mobilidade Urbana- Debates Estratégicos. Centro de Estudos e Debates Estratégicos Consultoria Legislativa*. Brasília: Edições Câmara.

Bonetti, W. Jr & Pietrantonio, H. (2006). *Utilização de semáforos atuados pelo tráfego*. Recuperado em 10 abril, 2020, de [http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/uso\\_e\\_parametrizacao\\_de\\_semaforos\\_atuados\\_%20pelo\\_trafego.pdf](http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/uso_e_parametrizacao_de_semaforos_atuados_%20pelo_trafego.pdf).

Bui K. -H. N., Jung J. E. & Camacho D. (2017). *Game theoretic approach on Real-time decision making for IoT-based traffic light control. Concurrency Computation: Practice and Experience*, 29(11), e4077. doi:10.1002/cpe.4077, 2017.

Carvalho, C. H. R. (2016). *Desafios da Mobilidade Urbana no Brasil*. Recuperado em 10 abril, 2020, de [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6664/1/td\\_2198.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6664/1/td_2198.pdf).

Cavalheiro, E. R. M. & Quaresma, C. C. (2020). *As diferentes implementações de controles semaforicos no Brasil*. In: *Anais do XXII Engema- Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*. São Paulo (SP) Fea/USP.

Recuperado em 10 janeiro, 2021, de <http://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/416.pdf>

Cavalheiro, Quaresma e Conti (2020). O uso de semáforos inteligentes na mobilidade urbana sustentável: Uma revisão sistemática de literatura. In: Anais do II SUSTENTARE e V WIPIS - Workshop Internacional sobre Sustentabilidade, Indicadores e Gestão de Recursos Hídricos. Campinas(SP) PUC-Campinas. Recuperado em 10 janeiro, 2021, de [https://www.even3.com.br/anais/2\\_SUSTENTARE\\_5\\_WIPIS/306525-O-USO-DE-SEMAFOROS-INTELIGENTES-NA-MOBILIDADE-URBANA-SUSTENTAVEL--UMA-REVISAO-SISTEMATICA-DE-LITERATURA](https://www.even3.com.br/anais/2_SUSTENTARE_5_WIPIS/306525-O-USO-DE-SEMAFOROS-INTELIGENTES-NA-MOBILIDADE-URBANA-SUSTENTAVEL--UMA-REVISAO-SISTEMATICA-DE-LITERATURA).

Celik, Y. & Karadeniz, A. T. (2018). Urban Traffic Optimization with Real Time Intelligence Intersection Traffic Light System- *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 6.

Censo Demográfico (2010). Censo aponta 190,7 milhões de brasileiros em 2010. Recuperado em 10 setembro, 2019, de <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/11/censo-aponta-1907-milhoes-de-brasileiros-em-2010.html>.

Chalmeton, S. (2015). London Smart Traffic Lights. Recuperado em 05 agosto, 2019, de <https://medium.com/mighty-things/london-smart-traffic-lights-605e1bc4a9a2>.

Cintra, M. (2008). Os custos do congestionamento na capital paulista. *GVexecutivo*, 62.

Cintra, M. (2013). A crise do trânsito em São Paulo e seus custos. *GVexecutivo*, 12.

Conselho Nacional de Trânsito. (2014). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito*. Brasília: Contran.

Conti, D. M. et al.. (2019). Collaborative governance towards cities sustainability transition. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11.

Creswell, J. W. W. (2010). *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. Porto Alegre: Bookman.

Cucci, J., Neto. (2016). Semáforo: Ser ou não ser Inteligente? Uma comparação entre o controle semaforico em tempos fixos e o em tempo real. Recuperado em 15 outubro, 2018, de <http://www.cetsp.com.br/media/479737/nt243.pdf>.

Cucci, J., Neto. (2018). Entrevista concedida a Eidy Regina Marcílio Cavalheiro. São Paulo.

Cury, P. (1977). Projeto SEMCO: Sistema de Controle de Tráfego em Área de São Paulo. Recuperado em 10 janeiro, 2021 de <http://www.cetsp.com.br/media/65250/bt07-projeto-semco.pdf>.

Departamento Nacional de Trânsito. (2020). Ministério da Infraestrutura- Frota de Veículos 2020. Recuperado em 26 maio, 2020, de <http://infraestrutura.gov.br/portarias-denatran/115-portal-denatran/9484-frota-de-ve%C3%ADculos-2020.html>

Departamento de Trânsito. (2012). Frota de Veículos em SP - por tipo de veículo. Recuperado em 10 maio, 2020, de <https://www.detran.sp.gov.br/wps/wcm/connect/portaldetran/detran/detran/estatisticastransito/sa-frotaveiculos/d28760f7-8f21-429f-b039-0547c8c46ed1>

Dessbesell, G. Jr., Frozza, R., Molz, R. F. (2015). Simulação de controle adaptativo de tráfego urbano por meio de sistema multiagentes e com base em dados reais. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*.

Dizengremel, P., Thiec, D., Bagard, M. & Jolivet, Y. (2008). Ozone risk assessment for plants: central role of metabolism-dependent changes in reducing power. *Environmental Pollution*, 156 (1), 11-15.

Dori, O. (2017). Israel's Smart Traffic Lights Will Put the Kibosh on Gridlock-Haaretz. Recuperado em 20 maio, 2020, de <https://www.haaretz.com/israel-news/business/israels-smart-traffic-lights-will-put-the-kibosh-on-gridlock-1.5458644>.

Duarte, P. (2016). A história dos semáforos. Recuperado em 10 janeiro, 2020, de <https://www.circulaseguro.pt/historia-dos-semaforos/>

El Hassak I. & Addaim A. (2019). Proposed solutions for smart traffic lights using machine Learning and Internet of Thing. *International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications*, WINCOM.

ElPais (2017). Trânsito de São Paulo está na lista dos cinco maiores congestionamentos da história. Recuperado em 10 maio, 2020, de [https://brasil.elpais.com/brasil/2017/05/08/internacional/1494262753\\_775936.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2017/05/08/internacional/1494262753_775936.html)

Empresa de Pesquisa Energética. (2015). Cenário econômico 2050. Ministério de Minas e Energia. Recuperado em 20 maio, 2020, de [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/PNE2050\\_Premissas%20econ%C3%B4micas%20de%20longo%20prazo.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/PNE2050_Premissas%20econ%C3%B4micas%20de%20longo%20prazo.pdf)

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. (2012). Semáforos Inteligentes. Recuperado em 15 abril, 2020, de <https://www.poli.usp.br/noticias/1450-semaforos-inteligentes.html>.

Frank A., Khamis Al Aamri Y. S. & Zayegh A. (2019). IoT based smart traffic density control using image processing. *4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*. doi:10.1109/icbdsc.2019.8645568, 2019.

Freire, L. R. (2020). Faixa de Pedestre na Alameda Santos - Detecção Automática de Travessia Sistema Puffin. Recuperado em 15 janeiro, 2021, de <http://www.cetsp.com.br/media/1073740/NT264.pdf>.

Fundação Instituto de Administração. (2018). Mobilidade Urbana: O que é, Desafios, Impactos e Soluções. Recuperado em 15 abril, 2020, de <https://fia.com.br/blog/mobilidade-urbana/>.

Ghazal B., Elkhatib K., Chahine K. & Kherfan M. (2016). Smart traffic light control system. *3rd International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications (EECEA)*.

Gibbs, G. (2009). Análise de dados qualitativos. Porto Alegre: Artmed.

Gomes, A. P. (2014). Os benefícios da operação em tempo real. Recuperado em 15 outubro, 2018, de <http://www.cetsp.com.br/media/372177/nt%20236.pdf>.

Guerrero-Ibáñez, J., Zeadally, S. & Contreras-Castillo, J. (2018). Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems. *Sensors* 18(4), 1-24.

Guse, C. (2019). New York City buses move faster with new traffic signal technology. Recuperado em 15 abril, 2020 de, <https://www.nydailynews.com/new-york/ny-transit-signal-priority-buses-dot-mta-20190407-gbhwdujpbvertiazj5xchrdomu-story.html>.

Hartanti D., Aziza R. N. & Siswipraptini P. C. (2019). Optimization of smart traffic lights to prevent traffic congestion using fuzzy logic. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 17(1), 320-327.

Holsti, O. R. (1969). *Content Analysis for the Social Sciences and Humanities*. Addison-Wesley Publishing Company.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2011). Censo Demográfico 2010. Recuperado em 26 maio, 2020 de, [https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/93/cd\\_2010\\_caracteristicas\\_populacao\\_domicilios.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/93/cd_2010_caracteristicas_populacao_domicilios.pdf)

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020a). População. Recuperado em 26 maio, 2020, de <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020b). Cidade- Panorama. Recuperado em 26 maio, 2020, de <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/panorama>

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (1998). Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público. *Revista dos Transportes Públicos*, 82(21).

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2010). Mobilidade urbana no Brasil. In: *Infraestrutura social e urbana no Brasil: subsídios para uma agenda de pesquisa e formulação de políticas públicas* (pp. 549-592). Brasília.

Iriti, M. & Faoro, F. (2008). Oxidative Stress, the paradigm of ozone toxicity in plants and animals. *Water, Air, and Soil Pollution*, 187(1), 285-301.

Kanungo A., Sharma A. & Singla C. (2014). Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing. *Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*. doi:10.1109/raecs.2014.6799542, 2014.

Kataria P. & Rani A. (2019). Real-Time Traffic Light Management System with Manual Control. *3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering, (RDCAPE)*.

Kitchenham, B. & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. *Technical Report EBSE 2007-001, Keele University and Durham University Joint Report.*

Kniess, C. T. et al.. (2019). Inovação urbana e recursos humanos para gestão de cidades sustentáveis. *Estudos Avançados*, 33(97), 119-136.

Knupfer, S. M., Bouton, S., Mihov, I., Swartz, S. (2015). Urban mobility at a tipping point. Recuperado em 10 maio, 2020, de <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/urban-mobility-at-a-tipping-point>

Kobie, N. (2018). London is hacking its traffic lights to slash waiting times. Recuperado em 05 agosto, 2019, de <https://www.wired.co.uk/article/traffic-lights-uk-london>.

Lakatos, E. M. & Marconi, M. A. (2011). *Metodologia científica*. São Paulo: Atlas.

Levinson, D. (2018). How Australia's traffic signals favour drivers and discourage walking. Recuperado em 05 agosto, 2019, de <https://www.theguardian.com/cities/commentisfree/2018/jun/11/how-australias-traffic-signals-favour-drivers-and-discourage-walking>

Liberal (2019). Congestion busting technology to keep drivers moving. Recuperado em 10 fevereiro, 2020, de <https://nsw.liberal.org.au/candidates/gladys-berejiklian/news/articles/CONGESTION-TECHNOLOGY-TO-KEEP-DRIVERS-MOVING>

Lin Y. -Q., Li M., Chen X. -C., Fu Y. -G. & Chi Z. -W. (2016). A Belief Rule Base Approach for Smart Traffic Lights. *9th International Symposium on Computational Intelligence and Design, (ISCID)*. doi:10.1109/iscid.2016.1113, 2016.

London Road Safety Council (2018). New system will 'revolutionise' London's traffic management. Recuperado em 10 fevereiro, 2020, de

<http://londonroadsafetycouncil.org.uk/new-system-to-revolutionise-urban-traffic-management/>

Lopes, D., Santos, V. & Bastos, J. V. S. (2016). Avaliação de tecnologias alternativas de detecção veicular para *SCOOT*. Recuperado em 10 maio, 2020, de <http://www.cetsp.com.br/media/501208/nt-248.pdf>

Loureiro, C., F., G., Gomes, M., J., T., L. & Leandro, C., H., P. (2005). Avaliação do desempenho nos períodos de pico do tráfego de intersecções semaforizadas com controle centralizado em tempo fixo e real. Recuperado em 21 maio, 2020, de <http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/scoot.pdf>

Magableh, A. A. A. R., Almakhadmeh, M. A., Alsrehin, N. & Klaib, A. F. (2020). Smart Traffic Light Management Systems: A Systematic Literature Review. *International Journal on Technology Diffusion*, 11(3).

Manasi P. S., Nishitha N., Pratyusha V. & Ramesh T. K. (2020). Smart Traffic Light Signaling Strategy. *International Conference on Communication and Signal Processing, (ICCSP)*. doi:10.1109/iccsp48568.2020.9182165, 2020.

Marshall, F. (2018). Smart traffic lights which always turn green to be trialled on Britain's roads. Recuperado em 05 agosto, 2019, de <https://www.telegraph.co.uk/news/2018/05/22/smart-traffic-lights-always-turn-green-trialled-britains-roads/>.

Martine, G., Ojima, R. & Fioravante, E. F. (2012) Transporte individual, dinâmica demográfica e meio ambiente. In: Manfredo, M. T. (2012). Martine, R. G. et al., *População e sustentabilidade na era das mudanças ambientais globais* (pp. 175-185). Campinas: ABEP.

Ming, S. H. (1997). Uma breve descrição do Sistema *SCOOT*. Recuperado em 15 outubro, 2018, de <http://www.cetsp.com.br/media/20764/nt%20201%20revisado.pdf>.

Ming, S. H. & Fowler, G. R. (1998). Avaliação antes/depois - Semáforos Inteligentes (SEMIN). Recuperado em 15 outubro, 2018, de <http://www.cetsp.com.br/media/20767/nt202.pdf>.

Mitcheell, B. (2008). Cidades engasgam com automóveis. Mega Cidades, OESP (entrevista). Recuperado em 10 setembro, 2019, de <https://cultura.estadao.com.br/blogs/ricardo-lombardi/cidades-engasgam-com-os-automoveis/>.

Miz V. & Hahanov V. (2014). Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things. *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*.

Mocnej, J., Seah, W. K. G., Pekár, A. & Zolotová, I. (2018). Decentralised IoT architecture for efficient resources utilization. *6, 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems (PDeS)* 51, 168–173.

Morrison, S. (2017). London 'could see traffic lights that prioritise cyclists and buses'. Recuperado em 05 agosto, 2019, de <https://www.standard.co.uk/news/london/london-in-frame-for-traffic-lights-that-prioritise-cyclists-and-buses-says-schemes-boss-a3540021.html>.

Mugnela, B. S. (2012). *Genpolis: Prototipagem e aplicação de um simulador de trânsito voltado para otimização de sinalização semafórica por meio de algoritmos genéticos*. (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Munst W., Dannheim C., Mäder M., Gay N., Malnar B., Al-Mamun M. & Icking C. (2015). Virtual traffic lights: Managing intersections in the cloud. *7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM)*.

Mustapha, K., Salah-ddine, K. & Elmaimouni, L. (2018). Smart Cities: Study and Comparison of Traffic Light Optimization in Modern Urban Areas Using Artificial Intelligence. Recuperado em 21 maio, 2020, de [https://www.researchgate.net/publication/323583258\\_Smart\\_Cities\\_Study\\_and\\_Comparison\\_of\\_Traffic\\_Light\\_Optimization\\_in\\_Modern\\_Urban\\_Areas\\_Using\\_Artificial\\_Intelligence](https://www.researchgate.net/publication/323583258_Smart_Cities_Study_and_Comparison_of_Traffic_Light_Optimization_in_Modern_Urban_Areas_Using_Artificial_Intelligence).

Natafqi M. B., Osman M., Haidar A. S. & Hamandi L. (2019). Smart Traffic Light System Using Machine Learning. *International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET)*. doi:10.1109/imcet.2018.8603041, 2018.

Netto, N. & Ramos, H. (2016). Estudo da Mobilidade Urbana no Contexto Brasileiro. *GeAs- Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 6(2).

Nguyen-Ly T. T., Tran L. & Huynh T. V. (2019). Low-cost, high-efficiency hardware implementation of smart traffic light system. *International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*. doi:10.1109/isee2.2019.8921146, 2019.

Nor R. F. A. M., Zaman F. H. K. & Mubdi S. (2017). Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN. *IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*. doi:10.1109/icsgrc.2017.8070582, 2017.

Observatório das Metrôpoles. (2012). Relatório: Crescimento da frota de automóveis e motocicletas nas metrôpoles brasileiras 2001-2011. - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia. Recuperado em 10 setembro, 2019 de, <https://www.observatoriodasmetrololes.net.br/metropole-sem-automovel-e-possivel/>.

Organização Mundial da Saúde (2015). Relatório Global sobre o estado da Segurança Viária 2015. Recuperado em 10 setembro, 2019 de [https://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/Summary\\_GSRRS2015\\_POR.pdf](https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/Summary_GSRRS2015_POR.pdf)

Palsa J., Vokorokos L., Chovancova E. & Chovanec M. (2019). Smart cities and the importance of smart traffic lights. *17th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*

Pero, V. & Stefanelli, V. (2015). A questão da mobilidade urbana nas metrópoles brasileiras. *Revista de Economia Contemporânea*, 19(3).

Plano de Mobilidade de São Paulo. (2015). Prefeitura do Município de São Paulo-Secretaria Municipal de Transportes. Recuperado em 10 maio, 2020, de [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/planmobsp\\_v072\\_\\_1455546429.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/planmobsp_v072__1455546429.pdf)

Portal do Governo do Estado de São Paulo. (2020). Metrô tem rede composta por seis linhas e 96 quilômetros de extensão. Recuperado em 10 maio, 2020, de <https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/metro-tem-rede-composta-por-seis-linhas-e-96-quilometros-de-extensao/>

Quaresma, C. C., Ferreira, M. L., Ruiz, M. S. & Oliveira, G. C., Neto. (2017) In: Cortese, T. T. P., Kniess, C. T., & Maccari, E. A. (Orgs), *Cidades inteligentes e Sustentáveis* (1a ed., 21-36). São Paulo: Manole.

Randolph, J. (2009). A Guide to Writing the Dissertation Literature Review. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 14.

Razavi M., Hamidkhani M. & Sadeghi R. (2019). Smart Traffic Light Scheduling in Smart City Using Image and Video Processing. *3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)*.

Ritchie, H. & Roser, M. (2018). Urbanization. Our world in data.

Road Traffic. (2015). Japan trials communicative traffic lights to minimise road accidents. Recuperado em 15 abril, 2020 de, <https://www.roadtraffic->

technology.com/news/newsjapan-trials-communicative-traffic-lights-to-minimise-road-accidents-4706680/

Robinson, I. (2020). Uma pequena revolução na engenharia de tráfego. Recuperado em 21 maio, 2020, de <https://portaldotransito.com.br/noticias/mobilidade/artigo-uma-pequena-revolucao-na-engenharia-de-trafego/>

Rodrigues, J. M. (2016). Mobilidade urbana no Brasil: crise e desafios para as políticas públicas. *Revista do Tribunal de Contas de Minas Gerais*, 34(3), 80-93.

Rolnik, R. (1997). *A cidade e a lei: legislação, política urbana e territórios na cidade de São Paulo*. São Paulo: Studio Nobel, Fapesp.

Rolnik, R. (2013). 459 anos: Celebrando a maior crise urbanística da história da cidade de São Paulo. Recuperado em 10 abril, 2020 de <https://raquelrolnik.wordpress.com/tag/mobilidade-urbana/>.

Rolnik, R. & Klintowitz, D. (2011). Mobilidade na cidade de São Paulo. *Estudos Avançados*, 25(71). São Paulo. Recuperado em 10 abril, 2020 de [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142011000100007](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142011000100007)

Saldiva, P. (2016) Por uma cidade mais saudável. Pesquisa Fapesp. Recuperado em 30 maio, 2020, de <https://revistapesquisa.fapesp.br/2016/03/21/paulo-saldiva-por-uma-cidade-mais-saudavel/>

Sangster N., Persad P. & Duncan D. (2009). Investigating the use of fuzzy logic for smart traffic lights at an overpass. *Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control*, 135-140.

Santos, M. (2008). *A urbanização brasileira*. São Paulo: Edusp.

Scaringella, R. S. (2001). A Crise da Mobilidade Urbana em São Paulo. Recuperado em 20 fevereiro, 2020, de [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-88392001000100007](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-88392001000100007).

Scarlato, F. C. (2005). População e urbanização brasileira. In: Ross, J. L. S. (Org.). *Geografia do Brasil* (5a ed., pp. 381-463). São Paulo: Edusp.

Schwartz, A. (2011). Midtown In Motion Could Eliminate NYC Traffic Jams-Fastcompany. Recuperado em 20 fevereiro, 2020, de <https://www.fastcompany.com/1768031/midtown-motion-could-eliminate-nyc-traffic-jams#:~:text=Midtown%20in%20Motion%20harnesses%20100,congestion%2C%20and%20vehicle%20travel%20times>.

Schmitt. (2018). New Traffic Signals in London Will Give Pedestrians the Green Light By Default- Streetsblog USA. Recuperado em 10 fevereiro, 2020, de <https://usa.streetsblog.org/2018/07/23/new-traffic-signals-in-london-will-to-give-pedestrians-the-green-light-by-default/>

Serrano Á., Conde C., Rodríguez-Aragón L. J., Montes R. & Cabello E. (2005). Computer vision application: Real time smart traffic light. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 525-530.

Stake, R. (1995). *The art of case research*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

Taher, F., El-Sayed, A., Shouman, A. & El-Mahalawy, A. (2016). Comparing Different Techniques for Controlling Traffic Signals. *International Journal on Power Engineering and Energy*, 7(3).

Transport for London. (2018). Delivering the next generation of urban traffic management. Recuperado em 05 agosto, 2019, de <https://tfl.gov.uk/info->

for/media/press-releases/2018/june/delivering-the-next-generation-of-urban-traffic-management.

Tribunal de Contas da União. (2010). Mobilidade Urbana. Recuperado em 30 maio, 2020 de, [https://portal.tcu.gov.br/tcu/paginas/contas\\_governo/contas\\_2010/fichas/Ficha%2005.2\\_cor.pdf](https://portal.tcu.gov.br/tcu/paginas/contas_governo/contas_2010/fichas/Ficha%2005.2_cor.pdf)

Triviños, A. N. da S. (2008). *Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação*. São Paulo: Atlas.

Tsuruta, K. (2014). Japanese Traffic Control Systems Alleviate Chaos and Congestion on Southeastern Asian Roads- Public Relations Office- Government of Japan. Recuperado em 15 abril, 2020, de [https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201412/201412\\_05\\_en.html](https://www.gov-online.go.jp/eng/publicity/book/hlj/html/201412/201412_05_en.html)

United Nations. (2018). World Urbanization Prospects The 2018 Revision. United Nations - Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

Vasconcelos, E. A. & Lima, I., M., O. (1998). IPEA- Quantificação das Deseconomias do Transporte Urbano: Uma Resenha das Experiências Internacionais. Recuperado em 30 maio, 2020, de [https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td\\_0586.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_0586.pdf)

Vandermotten C. (1985). *La production de l'espace industriel belge: 1846-1984. Hommes et Terres du Nord Année 1985 (pp. 100-109)*.

Vieira, J. D., Fontana, R. L. M., Barroso, R. C. A., Rodrigues, A. J. & Silva, J. A. B. (2015). A urbanização no mundo e no Brasil sob um enfoque geográfico. *Ciências Humanas e Sociais*, 3(1), 95-106. Recuperado em 15 abril, 2020, de <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernohumanas/article/view/2235/1381>.

Vilanova, L. M.; Cucci, J., Neto; Fernandes, S. R. R. (2005). O Controle de Semáforos em Tempo Real - A Experiência de São Paulo. <http://www.cetsp.com.br/media/65265/bt38-%20o%20controle%20de%20semaforos%20em%20tempo%20real.pdf>

Villela, A. V. & Suzigan, W. (1973). *Política econômica e crescimento da economia brasileira: 1889- 1945*. Brasília: Ipea/Inpes.

Yin, R. K. (2005). *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*. Porto Alegre, RS: Bookman editora.

Yuki, H. S. (2008). *Projeto de Controlador Inteligente para Semáforo*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, Brasil.

## APÊNDICE I- ARTIGOS DA RSL (104)

| Autores  | Título   | Ano  |
|--|--|------|
| [No author name available]   | Structured Object-Oriented Formal Language and Method - Third International Workshop, SOFL+MSVL 2013, Revised Selected Papers          | 2014 |
| [No author name available]   | 11th EAI International Conference on e-Infrastructure and e-Services for Developing Countries, AFRICOMM 2019                           | 2020 |
| [No author name available]   | 5th International Conference on Electrical Engineering Computer Science and Informatics, EECISI 2018                                   | 2018 |
| Adacher L., Gemma A., Oliva G.   | Decentralized spatial decomposition for traffic signal synchronization   | 2014 |
| Aggarwal P.K., Nigam P., Shrivastava V.  | Self controlled traffic management using autonomic system  | 2016 |
| Ajayi O., Bagula A., Isafiade O., Noutouglo A.   | Effective management of delays at road intersections using smart traffic light system  | 2020 |
| Al-qutwani M., Wang X.   | Smart traffic lights over vehicular named data networking  | 2019 |
| Alaidi A.H.M., Aljazaery I.A., AlRikabi H.T.S., Mahmood I.N., Abed F.T.                        | Design and implementation of a smart traffic light management system controlled wirelessly by arduino                                  | 2020 |
| Albatish I.M., Abu-Naser S.S.  | Modeling and controlling smart traffic light system using a rule based system  | 2019 |
| Alfith A., Kartina K.  | Development and designing smart traffic light with xbee pro  | 2018 |
| Alkhatib A.A.A., Sawalha T.  | Techniques for road traffic optimization: An overview  | 2020 |
| Almuraykhi K.M., Akhlaq M.   | STLS: Smart traffic lights system for emergency response vehicles  | 2019 |
| Ameddah M.A., Das B., Almhana J.   | Priority based Algorithm for Traffic Intersections Streaming Using VANET   | 2018 |
| Anagnostopoulos T., Ferreira D., Samodelkin A., Ahmed M., Kostakos V.                          | Cyclist-aware traffic lights through distributed smartphone sensing  | 2016 |
| Avrachenkov K., Perel E., Yechiali U.  | Finite-buffer polling systems with threshold-based switching policy  | 2016 |
| Barabas D., Banzhaf D., Titov W., Schlegel T.  | Smart Traffic Light Request Button – Improving Interaction and Accessibility for Pedestrians   | 2019 |
| Barzilai O., Voloch N., Hasgall A., Steiner O.L.   | Real life applicative timing algorithm for a smart junction with social priorities and multiple parameters                             | 2019 |
| Benzaman B., Sharma D.   | Discrete event simulation of a road intersection integrating V2V and V2I features to improve traffic flow                              | 2017 |
| Brilli G., Burgio P.   | An open source research framework for IoT-capable smart traffic lights   | 2019 |
| Brunner S., Kucera M., Waas T.   | Ontologies used in robotics: A survey with an outlook for automated driving  | 2017 |
| Bui K.-H.N., Jung J.E., Camacho D.   | Game theoretic approach on Real-time decision making for IoT-based traffic light control   | 2017 |
| Cacace S., Camilli F., De Maio R., Tosin A.  | A measure theoretic approach to traffic flow optimisation on networks  | 2019 |
| Caiza L.J., Alvarez R., Urquiza-Aguilar L., Calderón-Hinojosa X., Zambrano A.                  | VTM: Vehicular traffic monitor via images processing of Googlemaps   | 2018 |
| Carpio-Ali L., Oviedo-Meneses A., Reynoso-Torres S., Tejada-Espinoza A., Robles-Flores J.A.    | Improving traffic: Simulation with smart traffic lights [Mejorando la Circulación de Vehículos: Simulación con Semáforos Inteligentes] | 2018 |
| Castillo-Cara M., Huaranga-Junco E., Mondragón-Ruiz G., Salazar A., Barbosa L.O., Antúnez E.A. | Ray: Smart Indoor/Outdoor Routes for the Blind Using Bluetooth 4.0 BLE   | 2016 |
| Cervinka D., Salih O., Ahmad Z., Rajbhandari S.  | Reducing Noise Pollution of Emergency Vehicle Sirens with an Early Warning System  | 2018 |

| Autores   | Título   | Ano  |
|---|--|------|
| Chen R., Chen C.-H., Liu Y., Ye X.  | Ontology-based requirement verification for complex systems  | 2020 |
| Collotta M., Giuffrè T., Pau G., Scatà G.                                     | Smart traffic light junction management using wireless sensor networks   | 2014 |
| Costantino G., Martinelli F., Matteucci I., Mercaldo F.                       | Improving vehicle safety through a fog collaborative infrastructure  | 2018 |
| Cruz-Piris L., Rivera D., Fernandez S., Marsa-Maestre I.                      | Optimized sensor network and multi-agent decision support for smart traffic light management                         | 2018 |
| Dannheim C., Icking C., Gay N., Müntz W., Mäder M., Raffero M.                | Augmented traffic lights by means of cloud services  | 2019 |
| Delica P.D.L., Landicho M.R.U., Tabliga J.A.A., Virtus L.R., Anacan R.        | Development of an intelligent traffic control system using NI LabVIEW  | 2018 |
| Desai S., Thakkar A.  | The fog computing paradigm: a rising need of iot world   | 2019 |
| Diaz N., Guerra J., Nicola J.   | Smart Traffic Light Control System   | 2018 |
| Djuana E., Rahardjo K., Gozali F., Tan S., Rambung R., Adrian D.              | Simulating and evaluating an adaptive and integrated traffic lights control system for smart city application        | 2018 |
| Eckhoff D., Halmos B., German R.  | Potentials and limitations of Green Light Optimal Speed Advisory systems   | 2013 |
| El Hassak I., Addaim A.   | Proposed solutions for smart traffic lights using machine learning and internet of thing                             | 2019 |
| El-Sayed H., Sankar S., Prasad M., Puthal D., Gupta A., Mohanty M., Lin C.-T. | Edge of Things: The Big Picture on the Integration of Edge, IoT and the Cloud in a Distributed Computing Environment | 2017 |
| Elkhatib M.M., Adwan A.I., Alsamna A.S., Abu-Hudrouss A.M.                    | Smart traffic lights using image processing algorithms   | 2019 |
| Frank A., Khamis Al Aamri Y.S., Zayegh A.                                     | IoT based smart traffic density control using image processing   | 2019 |
| Freitas A., Brito L., Baras K., Silva J.                                      | Smart mobility: A survey   | 2017 |
| Galán-García J.L., Aguilera-Venegas G., Rodríguez-Cielos P.                   | An accelerated-time simulation for traffic flow in a smart city  | 2014 |
| George A.M., George V.I., George M.A.   | IOT based Smart Traffic Light Control System   | 2018 |
| Georges N., Fawaz S.  | The necessity for a sustainable traffic light system: The case study of el-koura district traffic light system       | 2018 |
| Ghazal B., Elkhatib K., Chahine K., Kherfan M.                                | Smart traffic light control system   | 2016 |
| Gupte S., Younis M.   | Vehicular networking for intelligent and autonomous traffic management   | 2012 |
| Hartanti D., Aziza R.N., Siswipraptini P.C.                                   | Optimization of smart traffic lights to prevent traffic congestion using fuzzy logic                                 | 2019 |
| Hawi R., Okeyo G., Kimwele M.   | Smart traffic light control using fuzzy logic and wireless sensor network  | 2018 |
| Hiari O., Nofal I.  | A Dynamic Decentralized Traffic Light Management System: A TCP Inspired Approach                                     | 2020 |
| Hosur J., Rashmi R., Dakshayini M.  | Smart traffic light control in the junction using Raspberry PI   | 2019 |
| Hunko E., Gladkova O., Parkhomenko A.   | Investigation and Development of Traffic Light Control System Prototype for Serious Game                             | 2020 |
| Ismail M.Z., Lutfi A.Z.A., Roslan M.A.M.                                      | Smart traffic light for emergency vehicle by using arduino   | 2019 |
| Kanungo A., Sharma A., Singla C.  | Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing                                | 2014 |
| Karakuzu C., Demirci O.   | Fuzzy logic based smart traffic light simulator design and hardware implementation                                   | 2010 |
| Kataria P., Rani A.   | Real-Time Traffic Light Management System with Manual Control  | 2019 |

| Autores   | Título   | Ano  |
|---|--|------|
| Krishna A.A., Kartha B.A., Nair V.S.  | Dynamic traffic light system for unhindered passing of high priority vehicles: Wireless implementation of dynamic traffic light systems using modular hardware | 2017 |
| Lee H.J., Kim R.Y.C., Son H.S.  | Evaluation of a smart traffic light system with an IOT-based connective mechanism  | 2017 |
| Lee M.-H., Im S.-Y., Lee B.-U., Roh B.-H., Kim B.-M.                            | Red-signal delay scheme to prevent vehicle accidents at the intersection   | 2015 |
| Lin Y.-Q., Li M., Chen X.-C., Fu Y.-G., Chi Z.-W.                               | A Belief Rule Base Approach for Smart Traffic Lights   | 2016 |
| Litvaitis R., Pakalnis A.   | Determination of the required configuration of traffic light at the junction between tunelio, M. K. Ciurlionio and girstupio streets in kaunas                 | 2012 |
| Lobo F.L., Lima M., Oliveira H., Harrington J., El-Khatib K.                    | SoLVE: A localization system framework for VANets using the cloud and fog computing  | 2017 |
| Mahali M.I., Wulandari B., Marpanaji E., Rochayati U., Dewanto S.A., Hasanah N. | Smart traffic light based on IoT and mBaaS using high priority vehicles method   | 2018 |
| Manasi P.S., Nishitha N., Pratyusha V., Ramesh T.K.                             | Smart Traffic Light Signaling Strategy   | 2020 |
| Matrella G., Marani D.  | An embedded video sensor for a smart traffic light   | 2011 |
| Miz V., Hahanov V.  | Smart traffic light in terms of the cognitive road traffic management system (CTMS) based on the Internet of Things  | 2014 |
| Möller D.P.F., Fidencio A.X., Cota E., Jehle I.A., Vakilzadian H.               | Cyber-physical smart traffic light system  | 2015 |
| Moran O., Gilmore R., Ordonez-Hurtado R., Shorten R.                            | Hybrid urban navigation for smart cities   | 2018 |
| Mungur A., Bheekaree A.S.B.A., Hassan M.B.A.                                    | Smart eco-friendly traffic light for mauritius   | 2019 |
| Munst W., Dannheim C., Mäder M., Gay N., Malnar B., Al-Mamun M., Icking C.      | Virtual traffic lights: Managing intersections in the cloud  | 2015 |
| Nale S.B., Kulkarni A.N.  | Intelligent Energy Efficient Traffic Safety & Alert system   | 2015 |
| Natafqi M.B., Osman M., Haidar A.S., Hamandi L.                                 | Smart Traffic Light System Using Machine Learning  | 2019 |
| Nguyen-Ly T.T., Tran L., Huynh T.V.   | Low-cost, high-efficiency hardware implementation of smart traffic light system  | 2019 |
| Ni J., Zhang K., Lin X., Shen X.S.  | Securing Fog Computing for Internet of Things Applications: Challenges and Solutions   | 2018 |
| Noei S., Santana H., Noei M., Sargolzaei A.                                     | Reducing traffic congestion using geo-fence technology: Application for emergency car  | 2014 |
| Nor R.F.A.M., Zaman F.H.K., Mubdi S.  | Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN  | 2017 |
| Oliveira L.F.P., Manera L.T., Luz P.D.G.  | Smart Traffic Light Controller System  | 2019 |
| Oliver A.S., Anuradha M., Ramya J.  | Automated pollution detection system using IoT and AWS cloud   | 2019 |
| Palsa J., Vokorokos L., Chovancova E., Chovanec M.                              | Smart cities and the importance of smart traffic lights  | 2019 |
| Piña J.A., Hsieh S.-J.T.  | Maker: Instructional module on use of a programmable logic controller for Smart Traffic Light control  | 2017 |
| Razavi M., Hamidkhani M., Sadeghi R.  | Smart Traffic Light Scheduling in Smart City Using Image and Video Processing  | 2019 |
| Razavi M., Hamidkhani, M. & Sadeghi R.  | Smart Traffic Light Scheduling in Smart City Using Image and Video Processing  | 2019 |
| Rezgui J., Barri M., Gayta R.   | Smart Traffic Light Scheduling Algorithms  | 2019 |
| Rhodes C., Djahel S.  | TRADER: Traffic light phases aware driving for reduced traffic congestion in smart cities  | 2017 |
| Richardson E., Davies P., Newell D.   | Modelling a Smart Motorway   | 2020 |
| Saikar A., Parulekar M., Badve A., Thakkar S., Deshmukh A.                      | TrafficIntel: Smart traffic management for smart cities  | 2017 |

| Autores  | Título   | Ano  |
|--|--|------|
| Samaniego-Calle V., Viñán-Ludeña M.S., Jaramillo-Sangurima W., Jácome-Galarza L., Sinche-Freire J. | Smart traffic lights and vehicular traffic: A comparative case study to reduce traffic jams and contaminants [Semáforos inteligentes y tráfico vehicular: Un caso de estudio comparativo para reducir atascos y emisiones contaminantes] | 2019 |
| Sangster N., Persad P., Duncan D.  | Investigating the use of fuzzy logic for smart traffic lights at an overpass   | 2009 |
| Serrano Á., Conde C., Rodríguez-Aragón L.J., Montes R., Cabello E.                                 | Computer vision application: Real time smart traffic light   | 2005 |
| Shevchenko V.I., Skatkov A.V., Bryukhovetskiy A.A., Chengar O.V., Kokodey T.A.                     | A conceptual model of communication for intelligent agents in the infrastructure of smart transportation systems   | 2020 |
| Shin S., Seo S., Eom S., Jung J., Lee K.-H.  | A pub/sub-based fog computing architecture for internet-of-vehicles  | 2016 |
| Silva C.M., Aquino A.L.L., Meira W., Jr.   | Smart Traffic Light for Low Traffic Conditions: A Solution for Improving the Drivers Safety  | 2015 |
| Silva J., Varela N., Lezama O.B.P.   | Optimizing street mobility through a NetLogo simulation environment  | 2020 |
| Singh R., Saini S., Bathla R.  | Autonomous Traffic Management using Big Data in a Network of IoT Enabled Devices   | 2019 |
| Sobitha Ahila S., Sivakumar D., Naveen Nanda M., Nivedita, Nair S.K., Kannan S.                    | Traffic lights analysis and manipulation for emergency vehicles using deep learning algorithm  | 2019 |
| Souravlias D., Luque G., Alba E., Parsopoulos K.E.   | Smart traffic lights: A first parallel computing approach  | 2016 |
| Stojmenovic I., Wen S.   | The Fog computing paradigm: Scenarios and security issues  | 2014 |
| Stojmenovic I., Wen S., Huang X., Luan H.  | An overview of Fog computing and its security issues   | 2016 |
| Sulistiono W.E., Liu S.  | Applying soft to constructing a smart traffic light specification  | 2014 |
| Tiwari P.  | Design and implementation of real time image inspection system   | 2014 |
| Wang S., Zhang Y., Yang Z., Chen Y.  | A graphical hierarchical CPS architecture  | 2017 |
| Yadav H., Iranna G.G., Nimallesh J., Kiran Kumar B., Archana B.                                    | Smart traffic light  | 2019 |
| Yi W., Yan J.  | Energy consumption and emission influences from shared mobility in China: A national level annual data analysis  | 2020 |
| Zaghal R., Thabatah K., Salah S.   | Towards a smart intersection using traffic load balancing algorithm  | 2018 |
| Zheng B., Lin C.-W., Shiraiishi S., Zhu Q.   | Design and analysis of delay-tolerant intelligent intersection management  | 2019 |

## APÊNDICE II- ESTRUTURA DO ROTEIRO DE ENTREVISTAS

| Aspectos investigados  | Questões da Pesquisa  | Fonte de Pesquisa   |
|--|---|---|
| História da Implantação de Semáforos Inteligentes em São Paulo | Qual a motivação da implantação de semáforos inteligentes em São Paulo?   | Cury, P.; Vilanova, L. M., Cucci, J., Neto e Fernandes, S. R. R.; Ming, S. H. e Fowler, G. R.   |
|  | Como foi feito o benchmark para buscar alternativas para São Paulo?   |   |
|  | Porque Londres surgiu como uma das alternativas?  |   |
|  | Quais outras tecnologias foram pesquisadas?   |   |
|  | O que levou a escolha do SCOOT?   |   |
| Implantação e resultados obtidos                               | Quais foram os principais benefícios gerados com a implementação?   | Ager, P. G.; Ming, S. H. e Fowler, G. R.; Cucci, J., Neto; Loureiro, C. F. G., Leandro, M. J. T. L. G. e Pires, C.H.  |
|  | Como foi estruturado o projeto de implementação, quais critérios foram considerados para priorizar as intersecções / regiões que foram instalados os semáforos? |   |
|  | Quais as principais dificuldades encontradas para manter os semáforos funcionando?  |   |
| Processo de desuso   | Como começou o processo de desuso?  |   |
|  | O que motivou?  |   |
|  | O que você acha que deveria ter sido feito para evitar?   |   |
|  | Outros lugares no Brasil, como Fortaleza, fazem uso do mesmo sistema que São Paulo instalou na década de 90. Como eles conseguiram manter o sistema em uso?     |   |
| Novos estudos/ tecnologias                                     | Quais foram as outras tecnologias/ possibilidades avaliadas para suprir a falta de uso do SCOOT? Foram avaliadas parcerias nesse sentido?                       | Lopes, D., Santos, V., Bastos, J. V. S.; Freire, L. R. Serrano Á., Conde C., Rodriguez-Aragón L.J., Montes R., Cabello E.; Sangster N., Persad P., Duncan D.; Kanungo A., Sharma A., Singla C.; Miz V., Hahanov V.; Munst W., Dannheim C., Mäder M., Gay N., Malnar B., Al-Mamun M., Icking C.; Ghazal B., Elkhatib K., Chahine K., Kherfan M.; Lin Y.-Q., Li M., Chen X.-C., Fu Y.-G., Chi Z.-W.; Nor R.F.A.M., Zaman F.H.K., Mubdi S.; Bui K.-H.N., Jung J.E., Camacho D.; Ameddah M.A., Das B., Almhana J.; Kataria P., Rani A.; Al-qutwani M., Wang X.; Nguyen-Ly T.T., Tran L., Huynh T.V.; Palsa J., Vokorokos L., Chovancova E., Chovanec M.; El Hassak I., Addaim A.; Razavi M., Hamidkhani M., Sadeghi R.; Frank A., Khamis Al Aamri Y.S., Zayegh A.; Frank A., Khamis Al Aamri Y.S., Zayegh A.; Hartanti D., Aziza R.N., Siswipraptini P.C.; Natafji M.B., Osman M., Haidar A.S., Hamandi L.; Alkhatib A.A.A., Sawalha T.; Manasi P.S., Nishitha N., Pratyusha V., Ramesh T.K.; Alaidi A.H.M., Aljazaery I.A., AlRikabi H.T.S., Mahmood I.N., Abed F.T. |
|  | O uso de novas tecnologias de detecção está sendo utilizado em outros lugares? Quais soluções seriam mais viáveis para São Paulo?                               |   |
| Avaliação sobre a revitalização do sistema                     | Você retomaria esse projeto em São Paulo? Como?<br>Parcerias<br>Tecnologias<br>Região   | PlanMob/ SP   |
|  | Como você vê as ações previstas no PlanMob/SP (2015) ??   |   |
| Situação atual do controle semafórico em São Paulo             | Quais novas ações, planos e tecnologias estão sendo analisados/ efetuados?  | Serrano Á., Conde C., Rodriguez-Aragón L.J., Montes R., Cabello E.; Sangster N., Persad P., Duncan D.; Kanungo A., Sharma A., Singla C.; Miz V., Hahanov V.; Munst W., Dannheim C., Mäder M., Gay N., Malnar B., Al-Mamun M., Icking C.; Ghazal B., Elkhatib K., Chahine K., Kherfan M.; Lin Y.-Q., Li M., Chen X.-C., Fu Y.-G., Chi Z.-W.; Nor R.F.A.M., Zaman F.H.K., Mubdi S.; Bui K.-H.N., Jung J.E., Camacho D.; Ameddah M.A., Das B., Almhana J.; Kataria P., Rani A.; Al-qutwani M., Wang X.; Nguyen-Ly T.T., Tran L., Huynh T.V.; Palsa J., Vokorokos L., Chovancova E., Chovanec M.; El Hassak I., Addaim A.; Razavi M., Hamidkhani M., Sadeghi R.; Frank A., Khamis Al Aamri Y.S., Zayegh A.; Frank A., Khamis Al Aamri Y.S., Zayegh A.; Hartanti D., Aziza R.N., Siswipraptini P.C.; Natafji M.B., Osman M., Haidar A.S., Hamandi L.; Alkhatib A.A.A., Sawalha T.; Manasi P.S., Nishitha N., Pratyusha V., Ramesh T.K.; Alaidi A.H.M., Aljazaery I.A., AlRikabi H.T.S., Mahmood I.N., Abed F.T.  |
|  | Qual a motivação para essas ações?  |   |

### APÊNDICE III- ROTEIRO DE ENTREVISTA ORIGINAL

Identificação e Orientações

**Nome do entrevistado:** \_\_\_\_\_

**Data:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ **Local da Entrevista:** \_\_\_\_\_

**Contato Inicial:**

- Agradecer pela disponibilidade
- Apresentar, de forma breve, os objetivos da pesquisa
- Explicar a Dinâmica da Entrevista

**Procedimentos Iniciais:**

- Organizar e preparar equipamentos para registrar os dados e a entrevista

**Informações complementares do entrevistado:**

Descrição das atividades profissionais/ocupação que desenvolve no meio relacionado a pesquisa

---

---

---

Experiência profissional. Histórico do tema de pesquisa

---

---

---

Questões

**História da Implantação de Semáforos Inteligentes em São Paulo:**

Qual a motivação da implantação de semáforos inteligentes em São Paulo?

Como foi feito o benchmark para buscar alternativas para São Paulo?  
 Porque Londres surgiu como uma das alternativas?  
 Quais outras tecnologias foram pesquisadas?  
 O que levou a escolha do *SCOOT*?

### **Implantação e resultados obtidos**

Quais foram os principais benefícios gerados com a implementação?  
 Como foi estruturado o projeto de implementação, quais critérios foram considerados para priorizar as intersecções / regiões que foram instalados os semáforos?  
 Quais as principais dificuldades encontradas para manter os semáforos funcionando?

### **Processo de desuso**

Como começou o processo de desuso?  
 O que motivou?  
 O que você acha que deveria ter sido feito para evitar?  
 Outros lugares no Brasil, como Fortaleza, fazem uso do mesmo sistema que São Paulo instalou na década de 90. Como eles conseguiram manter o sistema em uso?

### **Novos estudos/ tecnologias**

Quais foram as outras tecnologias/ possibilidades avaliadas para suprir a falta de uso do *SCOOT*? Foram avaliadas parcerias nesse sentido?  
 O uso de novas tecnologias de detecção está sendo utilizado em outros lugares?  
 Quais soluções seriam mais viáveis para São Paulo?

### **Opinião**

“Juntar urbanistas, técnicos de transporte urbano e os de trânsito não constituirá tarefa muito fácil, porém será essencial para acabar com o já tradicional divórcio das três "falanges". Muito se pode racionalizar, sintonizando as três políticas. Além de dados e da aproximação do uso de solo-transporte-trânsito, é preciso desenvolver ações de aumento da oferta de infra-estrutura, racionalização da demanda de viagens e monitoramento eletrônico do trânsito.”

“A informática, a engenharia de tráfego, a eletrônica, a tecnologia comportamental e a democratização da informação são ferramentas essenciais e que modernamente compõem o que se chama de trânsito inteligente. A informática está cada vez mais potente, barata e amigável ao usuário. É inadmissível que São Paulo tenha apenas 25% de semáforos inteligentes. O monitoramento eletrônico do trânsito em São Paulo deu os primeiros passos no pioneirismo dos semáforos coordenados e eletronicamente controlados a partir de 1982. O que falta é escala e atualização tecnológica. “

Essas foram colocações do Scaringella em um artigo publicado em 2001 chamado “A Crise da Mobilidade Urbana em São Paulo”.

Você concorda com essa colocação? Considera que, mesmo sendo de 2001, segue sendo vigente?

### **Avaliação sobre a revitalização do sistema**

Você retomaria esse projeto em São Paulo? Como?

Parcerias  
Tecnologias  
Região

Como você vê as ações previstas no PlanMob/SP (2015)?

Finalização

**Considerações finais:**

- Perguntar ao entrevistado se há alguma informação adicional que gostaria de acrescentar em relação aos assuntos abordados durante a entrevista.
- Perguntar se o entrevistado ficou com alguma dúvida.

**Agradecimento:**

- Agradecer a disponibilidade do entrevistado em fornecer as informações.
- Explicar que, após o retorno da viagem, será marcada uma nova entrevista com ele.
- Salientar que os resultados da pesquisa estarão à disposição dele e, se tiver interesse, deverá entrar em contato com o pesquisador.

## APÊNDICE IV- ROTEIRO DE ENTREVISTA REVISADO

Identificação e Orientações

**Nome do entrevistado:** \_\_\_\_\_

**Data:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ **Local da Entrevista:** \_\_\_\_\_

**Contato Inicial:**

- Agradecer pela disponibilidade
- Apresentar, de forma breve, os objetivos da pesquisa
- Explicar a Dinâmica da Entrevista

**Procedimentos Iniciais:**

- Organizar e preparar equipamentos para registrar os dados e a entrevista

**Informações complementares do entrevistado:**

Descrição das atividades profissionais/ocupação que desenvolve no meio relacionado a pesquisa

---



---



---

Experiência profissional. Histórico do tema de pesquisa

---



---



---

Questões

**História da Implantação de Semáforos Inteligentes em São Paulo:**

- Qual a motivação da implantação de semáforos inteligentes em São Paulo?
- Como foi feito o benchmark para buscar alternativas para São Paulo?
- Porque Londres surgiu como uma das alternativas?
- Quais outras tecnologias foram pesquisadas?
- O que levou a escolha do *SCOOT*?

**Implantação e resultados obtidos**

Quais foram os principais benefícios gerados com a implementação?  
 Como foi estruturado o projeto de implementação, quais critérios foram considerados para priorizar as intersecções / regiões que foram instalados os semáforos?  
 Quais as principais dificuldades encontradas para manter os semáforos funcionando?

**Processo de desuso**

Como começou o processo de desuso?  
 O que motivou?  
 O que você acha que deveria ter sido feito para evitar?  
 Outros lugares no Brasil, como Fortaleza, fazem uso do mesmo sistema que São Paulo instalou na década de 90. Como eles conseguiram manter o sistema em uso?

**Novos estudos/ tecnologias**

Quais foram as outras tecnologias/ possibilidades avaliadas para suprir a falta de uso do *SCOOT*? Foram avaliadas parcerias nesse sentido?  
 O uso de novas tecnologias de detecção está sendo utilizado em outros lugares?  
 Quais soluções seriam mais viáveis para São Paulo?

**Avaliação sobre a revitalização do sistema**

Você retomaria esse projeto em São Paulo? Como?  
 Parcerias  
 Tecnologias  
 Região  
 Como você vê as ações previstas no PlanMob/SP (2015)?

**Situação atual do controle semafórico em São Paulo**

Quais novas ações, planos e tecnologias estão sendo analisados/ efetuados?  
 Qual a motivação para essas ações?

Finalização

**Considerações finais:**

- Perguntar ao entrevistado se há alguma informação adicional que gostaria de acrescentar em relação aos assuntos abordados durante a entrevista.
- Perguntar se o entrevistado ficou com alguma dúvida.

**Agradecimento:**

- Agradecer a disponibilidade do entrevistado em fornecer as informações.
- Explicar que, após o retorno da viagem, será marcada uma nova entrevista com ele.
- Salientar que os resultados da pesquisa estarão à disposição dele e, se tiver interesse, deverá entrar em contato com o pesquisador.

