



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Luiz Fernando Pinto de Oliveira

**Desenvolvimento de um sistema controlador de  
semáforos sem fio, com monitoramento e  
progressão semafórica em tempo real aplicado à  
cidades inteligentes**

Campinas

2020

Luiz Fernando Pinto de Oliveira

**Desenvolvimento de um sistema controlador de  
semáforos sem fio, com monitoramento e progressão  
semafórica em tempo real aplicado à cidades inteligentes**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Tiago Manêra

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Luiz Fernando Pinto de Oliveira, e orientada pelo Prof. Dr. Leandro Tiago Manêra.

Campinas

2020

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

OL4d Oliveira, Luiz Fernando Pinto de, 1993-  
Desenvolvimento de um sistema controlador de semáforos sem fio, com monitoramento e progressão semafórica em tempo real aplicado à cidades inteligentes / Luiz Fernando Pinto de Oliveira. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Leandro Tiago Manêra.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Semáforo. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Internet das coisas. 4. Cidades inteligentes. I. Manêra, Leandro Tiago, 1977-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Development of a wireless traffic light controller system, with real-time traffic monitoring and green wave coordination applied to smart cities

**Palavras-chave em inglês:**

Traffic light

Wireless communication systems

Internet of things

Smart cities

**Área de concentração:** Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

**Titulação:** Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Leandro Tiago Manêra [Orientador]

Roberto Ribeiro Neli

Paulo Cardieri

**Data de defesa:** 13-03-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-1715-3340>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2933479914033849>

## COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Luiz Fernando Pinto de Oliveira RA: 211516

Data de defesa: 13 de Março de 2020

Titulo da Tese: “Desenvolvimento de um sistema controlador de semáforos sem fio, com monitoramento e progressão semafórica em tempo real aplicado à cidades inteligentes”.

Prof. Dr. Leandro Tiago Manêra (Presidente)

Prof. Dr. Paulo Cardieri

Prof. Dr. Roberto Ribeiro Neli

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*Dedico esta dissertação aos meus amados pais, Luiz Carlos Rodrigues de Oliveira e Rozilda da Silva Pinto, às minhas queridas irmãs, Marcela de Oliveira Guerra e Jéssica Pinto de Oliveira Mendonça, aos meus estimados cunhados, João Guerra Alves e Manoel Mendonça Neto e aos meus prezados sobrinhos Nathan Asaf de Oliveira Guerra e Nicolly Ketlyn de Oliveira Guerra.*

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me abençoar em todas as etapas da vida.

Gostaria de agradecer ao professor orientador Dr. Leandro Tiago Manêra por seu intenso trabalho de correção bibliográfica, tanto desta dissertação, quanto dos demais artigos científicos escritos e ao professor Me. Paulo Denis Garcez da Luz que prestou todo apoio técnico e científico de coorientação para a conclusão desta dissertação. Por estar presente não só durante o exame de qualificação, mas também durante a defesa do presente trabalho, gostaria de agradecer ao professor Dr. Paulo Cardieri. Por estar presente durante toda a minha vida acadêmica, gostaria de agradecer ao professor Dr. Roberto Ribeiro Neli, que me auxiliou durante minha graduação em Engenharia Elétrica, em meu primeiro estágio profissional, em meu primeiro Mestrado em Engenharia Elétrica internacional e agora na conclusão de meu segundo Mestrado em Engenharia Elétrica. Sou grato também aos meus queridos e amados pais Luiz Carlos Rodrigues de Oliveira e Rozilda da Silva Pinto que novamente não mediram esforços em me ajudar na carreira acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Seja 100 % motivado!”*  
*Luiz Fernando Pinto de Oliveira*

# Resumo

Desde o seu surgimento até os dias atuais, os semáforos controlam o trânsito de veículos. Porém, com o aumento do número de veículos públicos (ônibus) e privados (carro, moto e caminhão), situações de engarrafamento em centros urbanos estão se tornando cada vez mais frequentes. Tal fenômeno traz consigo problemas como aumento da poluição ambiental e sonora e congestionamentos. Para conter o aumento de tais problemas, as grandes cidades estão adotando o uso de tecnologias mais avançadas, aproximando-se do conceito de cidades inteligentes. O trabalho pretende contribuir para o aperfeiçoamento dos sistemas semafóricos, desenvolvendo um sistema controlador de semáforos por meio do uso de uma rede de comunicação sem fio. De forma a comprovar a eficácia do sistema desenvolvido, realizou-se o estudo e implementação dos principais tipos de interseções urbanas. O *hardware* do sistema é composto por um circuito atuador, para o acionamento de lâmpadas de corrente alternada e corrente contínua e um circuito sensor, para não só verificar se as lâmpadas estão queimadas, mas também detectar a requisição de travessia de pedestres, sendo que ambos circuitos são administrados por um microcontrolador. O *firmware* presente no microcontrolador efetua toda a lógica de controle, temporização e segurança do semáforo para cada tipo de cruzamento. Para que todos os semáforos de todos os cruzamentos possam operar da maneira pretendida, utilizou-se uma rede de comunicação sem fio com um protocolo de comunicação específico para intermediar a troca de informação entre os semáforos e sua central de controle. Implementou-se rotinas de controle direto dos semáforos da rede, permitindo o controle do sistema para eventos extraordinários, como o fechamento de vias devido à acidentes ou eventos públicos. Elaborou-se rotinas de segurança para que, em casos de problemas técnicos com um ou mais semáforos de um determinado cruzamento, imediatamente todos os semáforos entram em modo de alerta e notificam tal situação à central de gestão semafórica. O sistema semafórico, por meio da troca de informações entre a central e os semáforos, permite a implementação da onda verde para sucessivos cruzamentos. Com a elaboração de um protótipo composto por oito semáforos e com o auxílio de um analisador lógico conectado às saídas de cada grupo focal, foi possível montar o diagrama temporal dos estágios de operação de cada semáforo. Com isso, testou-se não só o funcionamento do sistema semafórico em uma situação normal de operação para cada tipo de interseção semafórica, mas também em situações de falhas semafóricas. A validação do sistema foi feita com base na comparação dos diagramas temporais teóricos e práticos, de forma que em todas as situações em que o sistema foi exposto o mesmo agiu da forma que foi projetado.

**Palavras-chaves:** Semáforo inteligente; Sistemas de comunicação sem fio; Internet das coisas; Cidades inteligentes.

# Abstract

From its emergence to the present day, traffic lights control the traffic of vehicles. However, with the increase in the number of public (bus) and private vehicles (car, motorcycle and truck), urban centers are becoming more and more populous. Such phenomenon increases environmental and noise pollution and cause congestion issues. To stem the rise of such problems, large cities are adopting the use of technological devices, approaching the concept of smart cities. Examining only the traffic management systems, several hardware and software solutions are being studied and implemented around the world. This paper aims to contribute to traffic signal systems improvement, developing a centralized traffic light controller system through the use of a wireless communication network. In order to prove the system efficacy, of most common types of urban intersections was carried out. The system hardware consists of an actuator circuit, for the switching of alternating current and direct current lamps and a sensor circuit, to not only check if the lamps are burnt out but also to detect the pedestrian crossing request, both of which circuits are managed by a microcontroller. The microcontroller's firmware performs all the control logic, timing and traffic light safety for each type of crossing. For all traffic lights at all intersections to operate as intended, a wireless communication network with a specific communication protocol was used to mediate the information exchange between the traffic lights at intersections and its control center. Routines for direct control of network traffic lights were implemented, allowing system control for extraordinary events, such as road closures due to accidents or public events. Safety routines have been designed so that, in the event of technical problems (burnt-out lamp, electrical or communication failure) with one or more traffic lights at a given intersection, all traffic lights immediately go into alert mode (flashing yellow) and notify the situation to the traffic management center, the network coordinator device. The traffic light system, through the information exchange between the central and the traffic lights, allows the green wave implementation for successive intersections. The development of a prototype composed of eight traffic lights (eight electronic boards) and with the aid of a logic analyzer connected to the outputs of each focal group, it was possible to create the timing diagram of the operation stages of each traffic light. It was tested not only the traffic light system operation in a normal operation situation for each type of traffic light intersection, but also situations of traffic light failures. The system validation was based on the comparison of the theoretical and practical time diagrams, so that in all situations in which the system was exposed, it acted in the way it was designed.

**Keywords:** Smart traffic light; Wireless communication systems; Internet of things; Smart cities.

# Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Composição de uma cidade inteligente. . . . .	23
Figura 2.2 – Composição de uma mobilidade inteligente. . . . .	24
Figura 2.3 – Tipos de conflitos em interseções. . . . .	25
Figura 2.4 – Travessias simples. . . . .	27
Figura 2.5 – Interseções em “T”. . . . .	29
Figura 2.6 – Interseções em ”Cruz”. . . . .	30
Figura 2.7 – Cabos de controle e comunicação de sistemas semafóricos em condições de má preservação (CET, 2013b). . . . .	32
Figura 2.8 – Composição de um semáforo inteligente. . . . .	34
Figura 3.1 – Composição do sistema semafórico. . . . .	41
Figura 3.2 – Arquitetura de alto nível do circuito eletrônico semafórico. . . . .	42
Figura 3.3 – Circuito esquemático do microcontrolador. . . . .	44
Figura 3.4 – Circuito esquemático do sensor de tensão das luminárias com alimentação DC. . . . .	46
Figura 3.5 – Circuito esquemático do sensor de tensão das lâmpadas com alimentação AC. . . . .	48
Figura 3.6 – Placa de circuito impresso do sistema semafórico proposto. . . . .	49
Figura 3.7 – Arquitetura de alto nível do <i>firmware</i> do sistema semafórico. . . . .	51
Figura 3.8 – Protocolo de comunicação semafórica. . . . .	52
Figura 3.9 – Esquema de funcionamento da rede. . . . .	53
Figura 3.10–Rotina de comunicação MEP de um cruzamento. . . . .	54
Figura 3.11–Rotina de comunicação MET de um cruzamento. . . . .	56
Figura 3.12–Representação de uma avenida com sucessivas interseções semafóricas. . . . .	60
Figura 3.13–Sincronismo entre as interseções. . . . .	61
Figura 3.14–Rotina de inicialização da onda verde. . . . .	61
Figura 3.15–Diagrama temporal teórico para uma interseção SIMPLES-MU. . . . .	63
Figura 3.16–Diagrama temporal teórico para uma interseção em CRUZ-MD/MD. . . . .	63
Figura 3.17–Modelo da rede XMesh. . . . .	65
Figura 3.18–Diagrama dos tipos de encriptação implementados pela rede XMesh. . . . .	68
Figura 4.1 – Metodologia dos testes. . . . .	71
Figura 4.2 – Travessia SIMPLES-MU. . . . .	72
Figura 4.3 – Interseção em CRUZ-MD/MD. . . . .	73
Figura 4.4 – Medidas de todos os semáforos de uma avenida em onda verde, com interseções SIMPLES-MU. . . . .	74
Figura 4.5 – Medidas de todos os semáforos de uma avenida em onda verde, com interseções em CRUZ-MD/MD. . . . .	75

Figura 4.6 – Desligamento do fornecimento de energia elétrica, para interseções SIMPLES-MD. . . . .	77
Figura 4.7 – Perda dos dados da comunicação sem fio. . . . .	78
Figura 4.8 – Interface <i>web</i> do sistema semaforico. . . . .	80
Figura A.1 – Travessia SIMPLES-MD. . . . .	95
Figura A.2 – Interseção em T-MU/MU 1. . . . .	95
Figura A.3 – Interseção em T-MD/MU 1. . . . .	96
Figura A.4 – Interseção em T-MU/MU 2. . . . .	96
Figura A.5 – Interseção em T-MD/MU 2. . . . .	96
Figura A.6 – Interseção em T-MU/MD. . . . .	97
Figura A.7 – Interseção em T-MD/MD. . . . .	97
Figura A.8 – Interseção em CRUZ-MU/MU. . . . .	97
Figura A.9 – Interseção em CRUZ-MU/MD. . . . .	98

# Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Especificações técnicas do microcontrolador utilizado. . . . .	43
Tabela 3.2 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada DC funcionando normalmente . . . . .	46
Tabela 3.3 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada DC queimada	47
Tabela 3.4 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada AC funcionando normalmente . . . . .	49
Tabela 3.5 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada AC queimada	49
Tabela 3.6 – Comparação dos preços de venda de diferentes controladores semafóricos	50
Tabela 3.7 – Principais protocolos de comunicação utilizados em RSSF. . . . .	64
Tabela 4.1 – $T_S$ teórico para uma avenida com oito interseções SIMPLES-MU. . . .	74
Tabela 4.2 – $T_S$ teórico para uma avenida com duas interseções em CRUZ-MD/MD.	75
Tabela B.1 – Relação de componentes de uma PCB completa. . . . .	99

# Lista de abreviaturas e siglas

CO<sub>2</sub> Dióxido de Carbono

NO<sub>x</sub> Óxidos de Nitrogênio

SO<sub>2</sub> Óxido de Enxofre

AC *Alternating Current*

AES *Advanced Encryption Standard*

ANTP Associação Nacional de Transportes Públicos

BLE *Bluetooth Low Energy*

CET Companhia de Engenharia e Tráfego

CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CI Circuito Integrado

CO Monóxido de Carbono

CONTRAN Conselho Nacional de Trânsito

DC *Direct Current*

DNIT Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes

ECC *Elliptic Curve Cryptography*

FUOTA *Firmware Update Over The Air*

GFP Grupo Focal Pedestre

GFV Grupo Focal Veicular

GPIO *General Purpose Input/Output*

ICT *Information and Communications Technology*

IEEE Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IoT *Internet of Things*

IoV *Internet of Vehicles*

IR Infra-vermelho

ISM *Industrial, Scientific and Medical*

LAN *Local Area network*

LED *Light-Emitting Diode*

LSERF Laboratório de Soluções em Eletrônica e RF

MD Mão Dupla

MEP Mestre Escravo Permanentes

MET Mestre Escravo Temporário

MOSFET *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*

MP Material Particulado

MP Movimento de Pedestres

MU Mão Única

MV Movimento Veicular

ONU Organização das Nações Unidas

PA *Power Amplifier*

PCI Placa de Circuito Impresso

PN Redes de Petri

RF Radiofrequência

RSSF Rede de Sensores Sem Fio

RTC *Real Time Clock*

SRAM *Static Random Access Memory*

SWD *Serial Wire Debug*

TBJ Transistor Bipolar de Junção

TC Transformador de Corrente

TCP *Transmission Control Protocol*

UDP *User Datagram Protocol*

USART *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*

VPDN *Virtual Private Device Network*

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa do projeto de pesquisa</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>Divisão do trabalho</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de interseções semaforicas</b>	<b>25</b>
2.2.1	Travessia simples	27
2.2.2	Interseções em “T”	28
2.2.3	Interseções em “Cruz”	28
<b>2.3</b>	<b>Sistema semaforico</b>	<b>31</b>
2.3.1	Semáforos tradicionais	31
2.3.2	Semáforos inteligentes	32
<b>2.4</b>	<b>Redes sem fio</b>	<b>36</b>
2.4.1	ZigBee	37
2.4.2	LoRaWAN	38
2.4.3	Bluetooth low energy	39
2.4.4	Wi-Fi	39
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Composição do projeto</b>	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>Hardware</b>	<b>41</b>
3.2.1	Circuito eletrônico do microcontrolador	43
3.2.2	Sensor de corrente DC	45
3.2.3	Sensor de corrente AC	47
3.2.4	Custo do protótipo	50
<b>3.3</b>	<b>Firmware</b>	<b>50</b>
3.3.1	Mensagens utilizadas	51
3.3.1.1	Comunicação mestre escravo permanentes	54
3.3.1.2	Comunicação mestre escravo temporários	55
3.3.1.3	Falha semaforica	56
3.3.1.4	Atuação semaforica	56
3.3.1.5	Leitura semaforica	57
3.3.2	Progressão semaforica em tempo real	57
3.3.3	Modelo matematico de coordenação da onda verde	59

3.4	Rede XMesh e módulo RF . . . . .	64
3.5	Atualização do sistema . . . . .	65
3.6	Segurança do sistema . . . . .	67
3.6.1	Segurança em nível de <i>hardware</i> . . . . .	67
3.6.2	Segurança em nível de <i>firmware</i> . . . . .	67
3.6.3	Segurança em nível de rede . . . . .	68
3.6.3.1	Encriptação em nível de <i>hardware</i> . . . . .	68
3.6.3.2	Encriptação em nível de <i>software</i> . . . . .	69
3.6.3.3	Encriptação em nível de protocolo . . . . .	69
4	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>70</b>
4.1	Metodologia . . . . .	70
4.2	Teste de detecção de lâmpadas queimadas . . . . .	71
4.3	Teste dos períodos de operação . . . . .	72
4.4	Teste da onda verde . . . . .	74
4.5	Testes de falhas semaforicas . . . . .	76
4.6	Interface <i>web</i> . . . . .	79
5	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>82</b>
5.1	Balanco . . . . .	82
5.2	Desenvolvimentos futuros . . . . .	83
5.3	Conclusão . . . . .	84
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE A – DIAGRAMAS TEMPORAIS DOS CRUZAMEN-</b>	
	<b>TOS ESTUDADOS . . . . .</b>	<b>95</b>
A.1	Travessia simples . . . . .	95
A.2	Interseção em T . . . . .	95
A.3	Interseções em cruz . . . . .	97
	<b>APÊNDICE B – LISTA DE COMPONENTES DO CIRCUITO CON-</b>	
	<b>TROLADOR DE SEMÁFOROS . . . . .</b>	<b>99</b>

# 1 Introdução

Cerca de 68 % da população mundial viverá em ambientes urbanos até 2050, conforme a projeção da urbanização mundial realizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2018 (NATIONS, 2018). O fenômeno da urbanização de áreas que antes eram predominantemente rurais trás consigo vantagens e desvantagens para população local. Maiores opções de emprego, estudos e lazer são alguns dos benefícios gerados. Por outro lado, o crescimento mau planejado de um município pode acarretar em malefícios para sua população, como o aumento do tráfego de veículos, gerando congestionamentos, poluição ambiental e sonora, bem como a diminuição da segurança dos cidadãos (BORIBOONSOM-SIN; BARTH, 2008; QI; ZHOU; LUAN, 2016; LI; SHIMAMOTO, 2012). Uma pesquisa realizada na cidade de Jaipur na Índia, relatou que 85 % das pessoas residentes na cidade consideram o tráfego rodoviário como sendo a maior fonte de poluição sonora. Sendo que 67 % dessas pessoas disseram possuir problemas de saúde relacionados à ruídos, como dores de cabeça e insônia (AGARWAL; SWAMI, 2011). Administrar o crescimento de uma cidade com tais malefícios é uma tarefa complexa, pois situações como de congestionamentos e acidentes de trânsito ocorrem diariamente, aleatoriamente e com prioridades distintas.

Com o propósito de solucionar as dificuldades encontradas junto ao crescimento urbano, diversas formas de dispositivos eletrônicos de alta tecnologia têm surgido ao redor do mundo, cada qual propondo resolver um determinado problema do cotidiano. Tais aplicações tecnológicas são frutos da disseminação da chamada *Internet of Things* (IoT) (INSTITUTE, 2014). O termo IoT possui diversas interpretações e definições, onde segundo (INSTITUTE, 2014), o termo IoT pode ser simplesmente compreendido, em seus aspectos físicos, como sendo: “uma rede de itens - cada um deles incorporado a sensores - conectados à Internet”.

Sensores são componentes eletrônico que medem propriedades físicas, como temperatura, aceleração, peso, som, localização, presença, entre outras (VOAS; AGRETI; LAPLANTE, 2018). Após a aferição feita pelos sensores, os dados podem ser utilizados singularmente ou em conjunto, por meio de sua fusão. A fusão de dados permite maximizar a qualidade dos dados medidos e a tomada de decisões, sendo de grande valia em ambientes complexos (ALAM et al., 2017).

Além da obtenção dessas informações, esses dispositivos às enviam para um sistema de comunicação com ou sem fio, onde posteriormente os dados poderão ser analisados por um sistema gestor supervisionado eletronicamente e/ou gerido por um profissional especializado.

Restritamente relacionado à questão dos congestionamentos urbanos, melhorias

tecnológicas em sistemas semafóricos estão sendo feitas por meio das tecnologias relacionadas com infraestrutura física, elétrica e tecnologias de informação e comunicação (ICT) (MOHANTY; CHOPPALI; KOUGIANOS, 2016; MOHANTY, 2018; SEMANJSKI; MANDZUKA; GAUTAMA, 2018).

Com o número de aplicações IoT crescendo cada vez mais e a carência constante por soluções estratégicas que tornem a vida em grandes centros urbanos agradável aos cidadãos, há o surgimento das chamadas *Smart Cities*, ou “cidades inteligentes”.

De acordo com Comunidade Técnica em Cidades Inteligentes do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), uma cidade é classificada como *Smart City* quando é capaz de reunir tecnologia, governo e sociedade para juntos viabilizarem uma gestão com uma economia, mobilidade, ambiente, pessoas, vida e governança inteligentes (COMMUNITY, 2018). De um ponto de vista mais simplista, uma *smart city* é “um lugar onde as redes e serviços tradicionais se tornam mais flexíveis, eficientes e sustentáveis com o uso de tecnologias de informação, digitais e de telecomunicações para melhorar as operações da cidade em benefício de seus habitantes” (MOHANTY; CHOPPALI; KOUGIANOS, 2016).

O controle e monitoramento de semáforos em tempo real já é praticado em grandes centros urbanos, como nas cidades de São Paulo e Fortaleza (MORENO; MAMEDE; FILHO, 2014). Porém em ambos casos o sistema que realiza a gestão do tráfego possui alto custo financeiro, custando mais de US\$70000,00 para realizar a sua implantação (FILHO, 2002).

Portanto, no sentido de contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias que modernizem os sistemas de gestão semafóricos, o presente trabalho se propõe a desenvolver um dispositivo eletrônico controlador de semáforos cujo controle e monitoramento é feito pela utilização de uma rede comunicação sem fio.

## 1.1 Justificativa do projeto de pesquisa

O desejo de promover avanços tecnológicos que auxiliem e/ou solucionem os problemas gerados pelo processo de urbanização global é a maior fonte de motivação do presente trabalho.

No ano de 2011, a empresa CISCO IBSG estimou que em 2020 haverá cerca de 50 bilhões de dispositivos conectados à internet (EVANS, 2011). Em 2018, a empresa de tecnologia Qualcomm presumiu que em 2026 haverá cerca de 6 bilhões de conexões apenas de aplicações envolvendo IoT (QUALCOMM, 2018). Este trabalho busca ser parte integrante de tais aplicações.

Segundo (SCHRANK et al., 2015), no ano de 2014 o congestionamento causou

aos norte americanos cerca de 6,9 bilhões de horas de viagem extras, consumindo em torno de 3,1 bilhões de litros de combustível extras, ocasionando um custo de engarrafamento de 160 bilhões de dólares. Como a tendência é que todos os semáforos sejam controlados por uma central, a elaboração de planos estratégicos de gestão permitirão reduzir as situações de congestionamento, como por exemplo aqueles provocados por mal dimensionamento dos temporizadores, bem como da falta de um controle que acompanhe o fluxo de veículos diariamente (NETO, 2016).

A Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) por meio do sistema de informações da mobilidade urbana reúne diversas informações (mais de 150 dados básicos) relacionado às atividades de transporte e trânsito urbanos dos municípios brasileiros, com população superior a 60 mil habitantes (ANTP, 2014). Seu banco de dados agrega informações de 2003 até 2016. Ao analisar o relatório comparativo dos anos de 2003 até 2014 nota-se uma evolução constante nas emissões de poluentes locais, atingindo o valor de emissão de 528 mil toneladas de poluentes por ano. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) considera os poluentes locais com sendo: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), material particulado (MP) e óxidos de Enxofre ( $SO_x$ ) (ANTP, 2016). Em relação às emissões de poluentes do efeito estufa (um dos fenômenos relacionados às mudanças climáticas), nota-se também um aumento constante das emissões totais (automóveis, motocicletas, ônibus e caminhões) de poluentes estufa, atingindo cerca de 29,3 milhões de toneladas por ano, nesse caso, o poluente do efeito estufa considerado é o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Cerca de 33 % das emissões de  $CO_2$  dos Estados Unidos, em 2004, foram devido ao transporte urbano, onde segundo (BORIBOONSOMSIN; BARTH, 2008), é possível reduzir em até 20 % a emissão de gases poluentes à atmosfera por meio de uma melhoria no sistema de gestão semafórica do trânsito urbano. Além de realizar o controle e monitoramento dos semáforos sem fio, o método de sincronismo equacionado e proposto nessa dissertação poderá contribuir para a progressão semafórica em tempo real e contribuindo, portanto, para a melhoria dos sistemas de gestão semafórica do trânsito urbano.

Estudos revelam que as rotinas sucessivas de frenagem e aceleração dos veículos em uma rodovia congestionada resultam em uma maior emissão de gases poluentes à atmosfera (BORIBOONSOMSIN; BARTH, 2008; LI; SHIMAMOTO, 2012). O uso de semáforos sem fio com a inserção de diversos sensores, também sem fios, em uma mesma rede, permitem ao gestor a criação de planos estratégicos de controle e sincronismo, priorizando determinadas rotas e mantendo-se constante a velocidade dos veículos. Outra grande área de pesquisa está relacionada com a *Internet of Vehicles* (IoV), ramo científico dedicado aos estudos relacionados com a comunicação entre os próprios veículos da via, que por meio de circuitos embarcados equipados com sensores, permitem a coleta das condições da estrada (CHEN; CHANG, 2017; WANG et al., 2019). Portanto outra utilidade dos semáforos sem fio, apresentado nesta obra, está na possibilidade de integração com veículos

que possuem aplicações IoV.

A comunicação sem fio pode proporcionar a troca de informações entre semáforos e veículos públicos, como viaturas policiais e ambulâncias, equipados com dispositivos eletrônicos, de modo que ao ser detectado tal veículo em situação de emergência, o sistema gestor pode criar rotas para priorizar sua locomoção. Por conseguinte, a implementação do presente trabalho viabiliza o desenvolvimento de outros dispositivos tecnológicos associados à *smart city*.

De acordo com a Companhia de Engenharia e Tráfego (CET) da cidade de São Paulo, para uma completa revitalização semaforica da cidade seriam necessários 2520 km de cabos elétricos (CET, 2013a). E ainda segundo a CET, 11 % das ocorrências que geram a inoperância do sistema de sinalização da cidade são devido à desgastes do cabeamento e umidade e cerca de 13 % devido à agentes externos como o roubo dos próprios cabos e vandalismo (CET, 2013b). Por se tratar de um sistema semaforico cuja comunicação será realizada completamente sem fio, inibir-se-ia tais ocorrências com a utilização do presente sistema semaforico proposto nesta obra. Além disso, com a elaboração de um dispositivo controlador de semáforos de tamanho reduzido, sua localização poderia se situar no interior dos grupos focais veiculares, dificultando sua identificação e reduzindo, portanto, atos de vandalismo.

Devido ao mundo estar passando pelo processo da 4ª revolução industrial, aplicações tecnológicas em sistemas cyber-físicos tem tido uma grande demanda por grandes empresas do setor, sendo que entre 2017 e 2025, espera-se investimentos nesse mercado perto de 15 trilhões de dólares (NEWMAN, 2018).

Portanto, dentro da proposta deste trabalho, o uso de um sistema de comunicação sem fio para o controle de semáforos poderá contribuir para a eliminação dos cabos de comunicação (sujeitos à ações de roubo e práticas de vandalismo), controle em tempo real do estado de funcionamento do sistema, atualização remota dos tempos dos semáforos, criação de planos de gestão semaforica, realizar o sincronismo entre vários cruzamentos consecutivos, além da integração com outros dispositivos/sensores sem fio dispostos ao longo cidade.

## 1.2 Objetivo

A intenção da abordagem do tema proposto é realizar o desenvolvimento de um sistema controlador de semáforos *wireless* para ser utilizado em aplicações de *smart cities* propondo alcançar os seguintes objetivos:

- Desenvolver um circuito eletrônico controlador de semáforos genérico, que sirva para o acionamento de lâmpadas, tanto alimentadas por corrente alternada (*Alternating*

*Current* - AC), quanto por corrente contínua (*Direct Current* - DC), permitindo uma maior flexibilidade em futuras aplicações;

- Realizar a comunicação por meio do protocolo de comunicação da rede em desenvolvimento no Laboratório de Soluções em Eletrônica e RF (LSERF), para comunicar-se de forma sem fio com os demais semáforos do cruzamento, bem como com a central de gestão semafórica;
- Efetuar a programação dos principais tipos de cruzamentos semafóricos, com e sem botoeiras, de forma a verificar a robustez do sistema;
- Implementar a programação da progressão semafórica em tempo real, propondo mais uma ferramenta de auxílio à redução de congestionamentos rodoviários;
- Elaborar rotinas de segurança do sistema, que informem à central de gestão o estado de funcionamento do sistema, das lâmpadas e da comunicação.

### 1.3 Divisão do trabalho

A elaboração desta obra foi desenvolvida de forma a estabelecer um entendimento progressivo do tema proposto. Em vista disso, este trabalho é particionado em cinco capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Desenvolvimento do projeto, Resultados e Conclusões.

O Capítulo 1 é organizado de forma a expor a origem dos problemas relacionados com a temática do trabalho, além de descrever sucintamente quais são as motivações, objetivos e resultados esperados dentro do cronograma de trabalho proposto.

Após reunir as informações básicas relacionadas aos problemas encontrados na má gestão de tráfego, o Capítulo 2 apresenta os principais tipos de interseções semafóricas, as diferenças entre semáforos tradicionais e inteligentes, além de apontar as redes sem fio mais utilizadas em aplicações de cidades inteligentes.

O Capítulo 3 descreve, de forma técnica, detalhes do circuito eletrônico desenvolvido. Explica de forma sucinta a função dos códigos do *firmware* principal, as rotinas de interpretação do protocolo de rede e de comunicação com o módulo de Radiofrequência (RF).

De forma a avaliar o desempenho do circuito eletrônico projetado, o Capítulo 4 descreve todos testes realizados com os circuitos controladores de semáforos operando em diversas interseções, com/sem progressão semafórica em tempo real e o comportamento do sistema perante a possíveis falhas semafóricas.

---

O último capítulo desta obra busca relatar os principais desafios encontrados durante o desenvolvimento do trabalho, listar as tarefas concretizadas, propor eventuais desenvolvimentos futuros, além de pautar as conclusões obtidas.

## 2 Revisão bibliográfica

*Este capítulo busca compreender as reais limitações dos sistemas semaforicos atuais, pontuando suas vantagens e desvantagens para o controle do tráfego urbano. Descreve as soluções de engenharia existentes para promover melhorias tecnológicas para os sistemas semaforicos. Após compreender as características dos sistemas de gestão de tráfego, o presente capítulo realiza um estudo dos principais tipos de interseções semaforicas existentes, com o intuito de analisar o modo de operação dos semaforos em cada um dos cenários possíveis.*

### 2.1 Contextualização

Os constantes esforços em solucionar problemas energéticos, econômicos e ambientais exigem cada vez mais que a humanidade busque por meios alternativos de convivência em grandes centros urbanos. Os avanços tecnológicos na área de engenharia são frequentemente utilizados como ferramenta para reparar problemas específicos. Baseado em (SEMANJSKI; MANDZUKA; GAUTAMA, 2018), a Figura 2.1 exibe um modelo simples e genérico da composição de uma cidade inteligente.

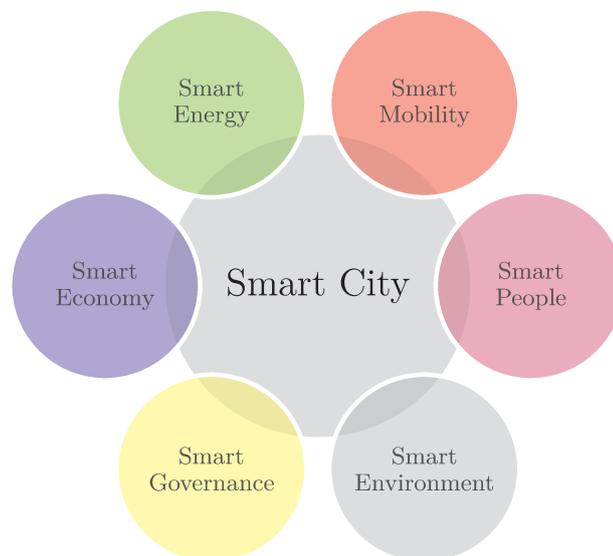


Figura 2.1 – Composição de uma cidade inteligente.

Dentre as áreas de atuação aplicadas às cidades inteligentes (*smart cities*), o ramo de mobilidade inteligente (*smart mobility*) destaca-se por sua capacidade de propor soluções de redução de congestionamentos, acidentes e de poluição ambiental e sonora.

Ao abordar apenas as questões de *smart mobility*, novamente surgem novas áreas de concentração, de acordo com (FREITAS et al., 2017) todas propondo auxiliar na resolução dos problemas de mobilidade urbana, conforme visto na Figura 2.2.

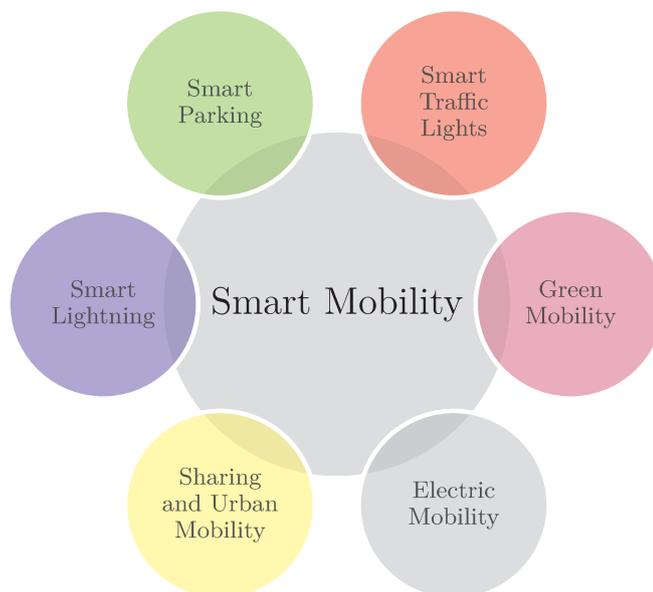


Figura 2.2 – Composição de uma mobilidade inteligente.

Cada ramo de atuação visto na Figura 2.2 possuem as seguintes características:

- *Smart traffic lights*, ou semáforos inteligentes, visam mitigar problemas de gestão do fluxo de veículos, consumo de combustível e emissões veiculares, bem como a poluição sonora (BATTARRA; ZUCARO; TREMITERRA, 2017);
- Os *smart parkings* (estacionamentos inteligentes) realizam a gestão de vagas disponíveis para veículos em ambientes públicos (LIN; RIVANO; LE MOUEL, 2017; RENUKA; DHANALAKSHMI, 2013);
- *Smart lightning*, realiza o controle, monitoramento do consumo energético e verificação do funcionamento individual do sistema de iluminação pública, proporcionando ambientes mais agradáveis, seguros e sustentáveis (CASTRO; JARA; SKARMETA, 2013);
- O termo *sharing and urban mobility* refere-se aos novos modelos de transporte urbano, que permitem ao usuário realizar seu deslocamento pela cidade por meio de carros ou bicicletas compartilhadas (FREITAS et al., 2017; COLORNI et al., 2015);
- Uma infraestrutura que viabilize o uso de veículos movidos à eletricidade reduzindo a poluição ambiental e sonora faz parte da *electric mobility*;

- A *green mobility* está relacionada às estratégias de redução de poluição ambiental, como por exemplo fazer o uso das informações geradas pelos *smart parkings* de forma à informar a disponibilidade de vagas de estacionamento a fim de reduzir o consumo de energia (XIA et al., 2018).

Apesar do ambiente de pesquisa em *smart mobility* possuir diversas subáreas, conforme descritas anteriormente, o presente trabalho se restringe a abordagem dos semáforos inteligentes, devido ao seu grande impacto no cotidiano tanto de centros urbanos emergentes, quanto de grandes metrópoles.

## 2.2 Tipos de interseções semaforizadas

Com o objetivo de padronizar a terminologia sobre o projeto de interseções rodoviárias, o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) define o termo “interseção” como sendo a área em que duas ou mais vias se unem ou se cruzam (DNIT, 2005). Porém no momento da união de duas ou mais vias, de acordo com o tipo de movimento que o veículo fizer, poderá haver situações de conflito, como por exemplo conflitos de cruzamento, de convergência e de divergência, todos representados na Figura 2.3.

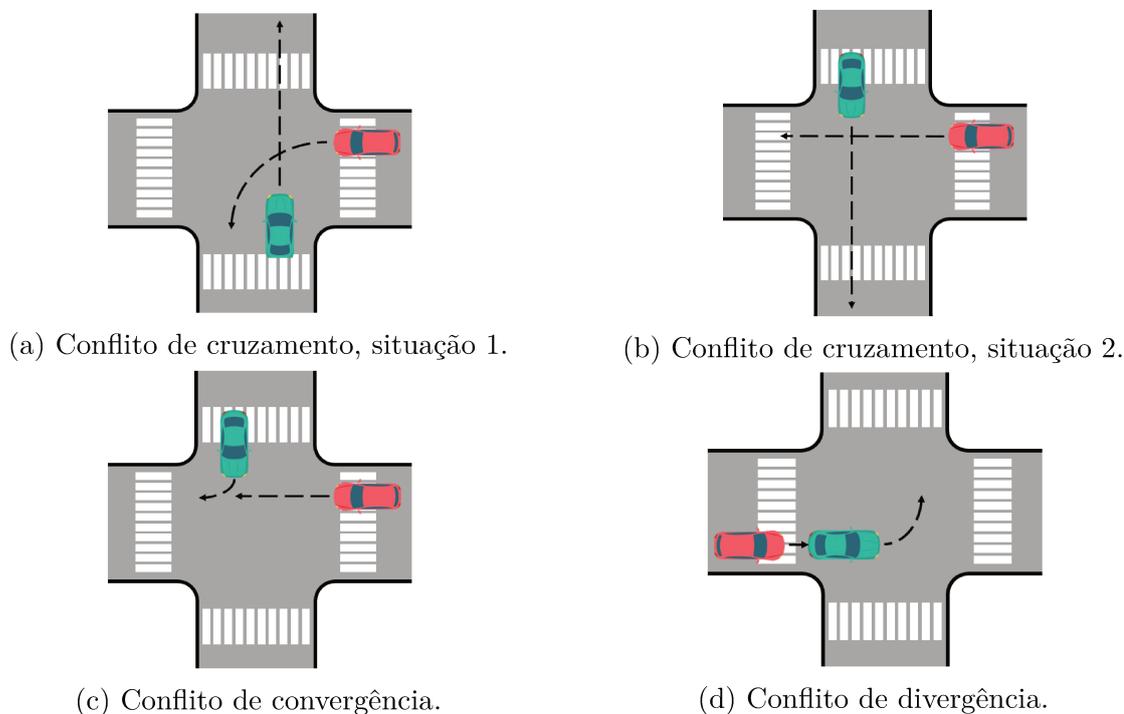


Figura 2.3 – Tipos de conflitos em interseções.

Para realizar o gerenciamento de conflitos em interseções, segundo o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) (CONTRAN, 2014), existem diferentes abordagens, como por exemplo:

- Determinação de preferências de passagem;
- Redução das velocidades nas aproximações;
- Implantação de minirrotatórias;
- Reforço da sinalização de advertência.

Porém, se todas as abordagens anteriores não forem consideradas suficientes para gerenciar os pontos de conflito, outra alternativa disponível é a implantação da sinalização semafórica. O autor do trabalho (VILANOVA, 2007) realizou uma pesquisa sobre os critérios adotados para a implantação de semáforos em diversos países, como Estados Unidos, Argentina, Portugal, Brasil e Escócia. Após efetuar várias análises ele conclui que o critério adotado pela CET em São Paulo aparenta ser bastante adequado, cuja escolha dá-se pela análise de três aspectos:

- Segurança viária;
- Fluidez dos veículos;
- Travessia de pedestres.

Desse modo, caso um ou mais dos aspectos supracitados careça da realização de melhoria das condições de operação, poder-se-á utilizar semáforos na respectiva interseção.

Independentemente de um semáforo ser inteligente ou não, o mesmo possui um determinado ciclo de operação para cada tipo de interseção. Segundo (MARTINS, 2013), os tipos básicos de interseções urbanas são:

- Interseções com 3 aproximações, em “T”;
- Interseções com 4 aproximações, em “Cruz”;
- Interseções com múltiplas aproximações.

Considerando que quanto maior o número de aproximações de uma interseção, e se ela é de Mão Única (MU) ou Dupla (MD), sua complexidade de programação aumenta e, dado ao fato de existirem diversas combinações, para o presente trabalho optou-se pelo estudo, com posterior implementação, das seguintes interseções:

- Travessia SIMPLES-MU e SIMPLES-MD;
- Interseção em T MU/MU tipo 1, MU/MU tipo 2, MU/MD, MD/MU tipo 1, MD/MU tipo 2 e MD/MD;

- Interseção em Cruz MU/MU, MU/MD e MD/MD.

Tais interseções são variações das interseções em “T”, em “Cruz” e simples, tanto para MU quanto para MD. As subseções seguintes abordarão cada uma das situações enumeradas anteriormente.

### 2.2.1 Travessia simples

Uma travessia simples, como a vista no diagrama de estágios da Figura 2.4, é caracterizada por uma faixa de pedestres cruzando uma via.

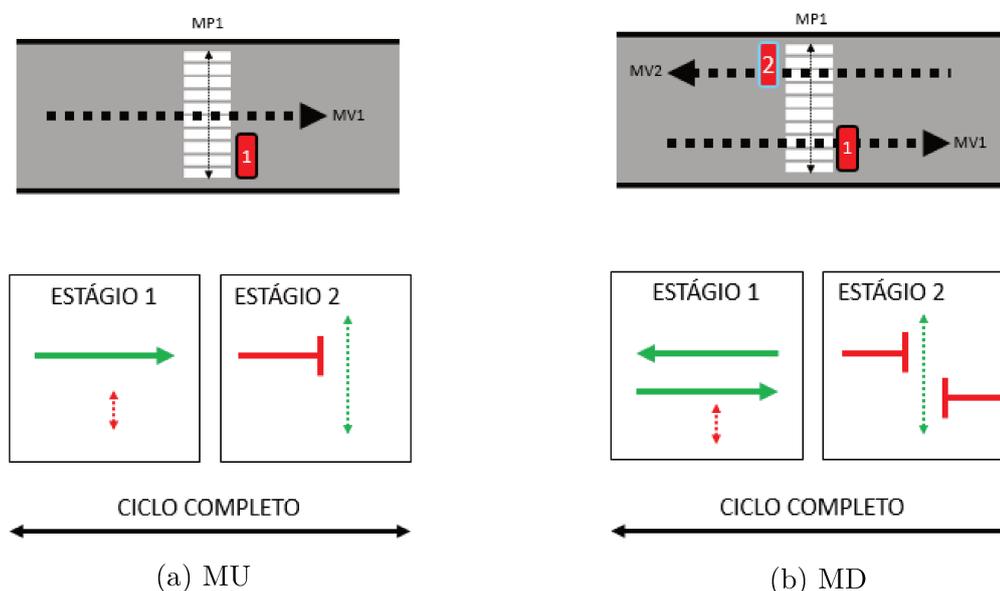


Figura 2.4 – Travessias simples.

Por se tratar de uma via de mão única, a travessia apresentada na Figura 2.4a necessita apenas de um semáforo para bloquear o movimento veicular (MV) 1 e permitir o movimento de pedestres (MP) 1. Os semáforos podem ser representados por retângulos vermelhos enumerados, com a borda preta (mestre do cruzamento), amarela (escravo com ciclo de operação diferente ao do mestre) e turquesa (escravo com ciclo de operação igual ao do mestre). Os retângulos representam os semáforos que possuem ambos grupos focais veicular (GFV - composto pelas luzes verde, amarela e vermelha para veículos) e de pedestres (GFP - composto pelas luzes verde e vermelha para pedestres).

Cada estágio da Figura 2.4 representa um estado (verde, amarelo ou vermelho) para determinado semáforo. Já um ciclo de operação completo representa a execução de todos os estágios de um semáforo, isto é, seu diagrama de estágios.

Por outro lado, quando a via possui dois sentidos, vide a Figura 2.4b, há a necessidade de se ter dois semáforos, para bloquear os MV1 e MV2 e permitir o MP1.

Nesse caso, o semáforo 2 (com sua borda cor turquesa) terá seu funcionamento idêntico ao semáforo 1. Os conceitos de semáforos mestre e escravo serão introduzidos na Seção 3.3.

### 2.2.2 Interseções em “T”

Ao considerar interseções com três aproximações, ou seja, em “T” o número de possibilidades de MV cresce significativamente. Ao realizar a análise deve-se garantir que ambos, veículos e pedestres, realizem seus movimentos de forma segura, isto é, sem expor ambos em situação de risco de acidente. A Figura 2.5 exhibe os MV, MP com seus respectivos estágios de operação para todas as possibilidades da interseção.

Situações como o estágio 3 da Figura 2.5b representam o estágio para pedestres, executado apenas quando uma requisição é feita por meio de um botão de prioridade (botoeira) (CONTRAN, 2014). Desse modo, caso haja uma requisição de MP (pressionamento da botoeira), o estágio para pedestres será inserido ao final do ciclo de operação do semáforo. Caso não haja uma requisição de MP, o ciclo de operação completo semafórico será composto apenas pelos estágios 1 e 2, para o caso da interseção da Figura 2.5b.

Para este tipo de interseção, há a possibilidade de haver semáforos apenas com GFP, conforme exemplificado na Figura 2.5a. Tais semáforos são identificados através de quadrados, ao invés de retângulos. Ainda analisando a Figura 2.5a, observa-se que os semáforos com apenas GFP possuem bordas amarelas, indicando que eles operam em estados diferentes de seu mestre, semáforo 1. Pois ao abrir o semáforo 1, ambos semáforos 2 e 3 devem bloquear os MP2 e MP3. Portanto, para uma mesma interseção em “T”, poderá haver até seis modos de operação dos semáforos, com ciclos de operação distintos e números de estágios variável.

As Figuras 2.5c, 2.5d, 2.5e e 2.5f representam as demais variações das interseções em “T”, sendo a interseção T-MD/MD, Figura 2.5f, considerada a interseção mais complexa das interseções em “T” estudadas, por possuir seis diagramas temporais (Figura A.7a do Apêndice A.3) e três diagramas de estágio.

### 2.2.3 Interseções em “Cruz”

Ao ser adicionada mais uma aproximação no cruzamento, tem-se a interseção em “Cruz”. Para evitar a possibilidade de haver MV conflitantes, é inserido mais um semáforo para controlar a nova aproximação. As novas possibilidades de MV e MP podem ser visualizadas na Figura 2.6.

Os estágios 3, 4 e 5 das Figuras 2.6a, 2.6b e 2.6c, respectivamente, representam a execução dos estágios dos pedestres. Como as interseções em CRUZ-MU/MD e MD/MU possuem o mesmo ciclo de operação, optou-se por analisar apenas a interseção em CRUZ-MU/MD.

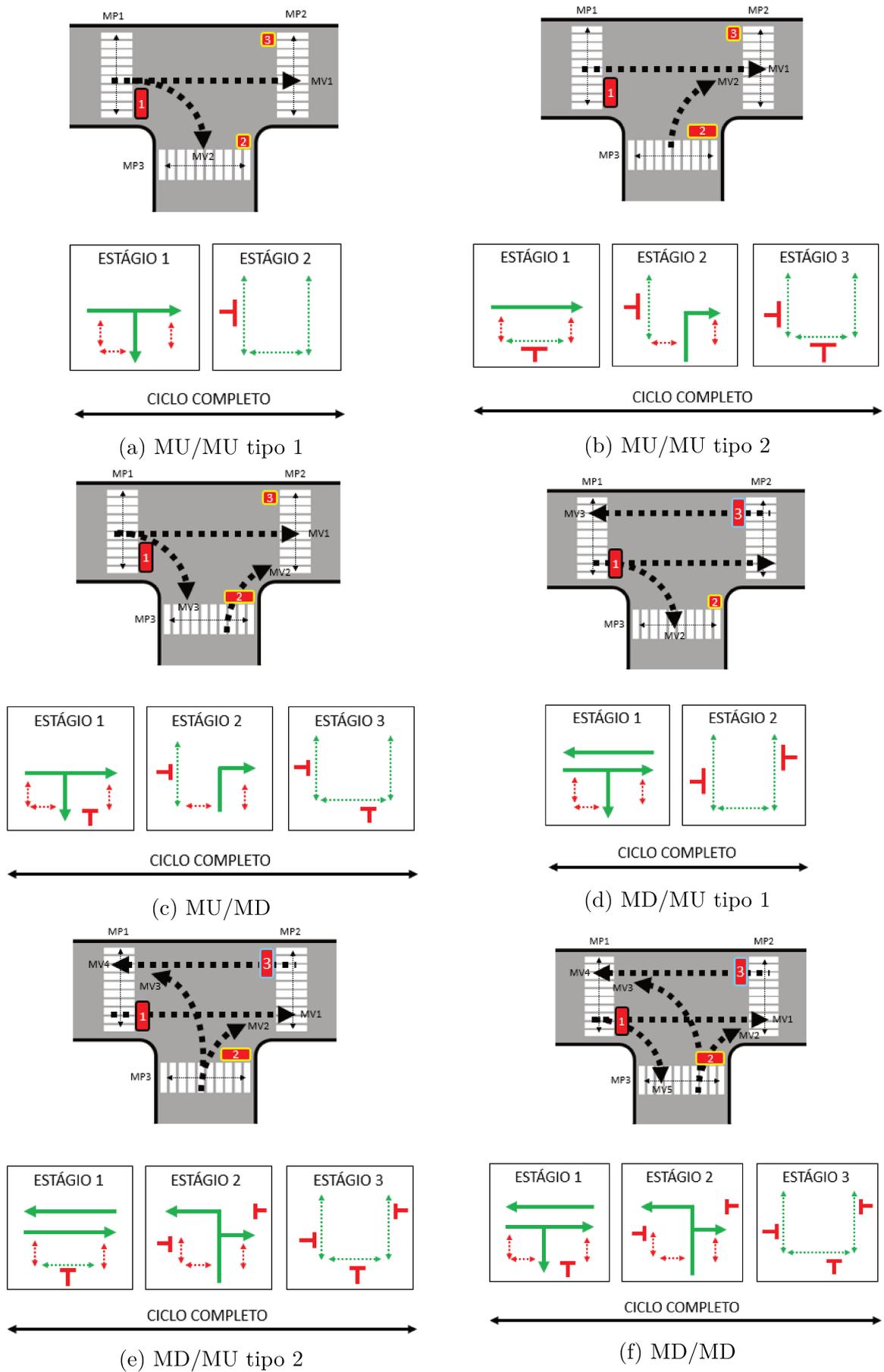
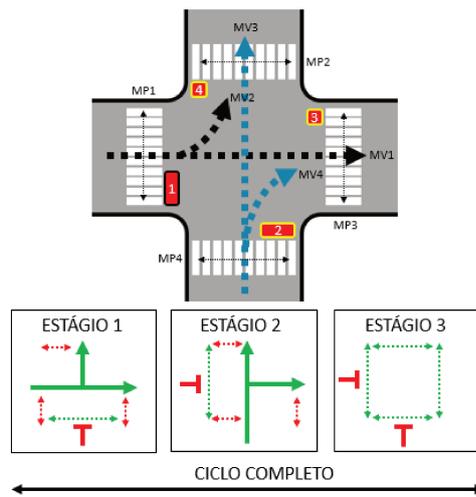
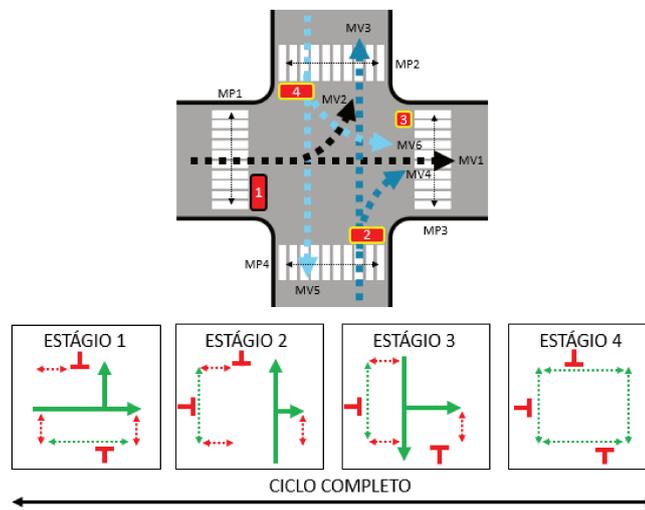


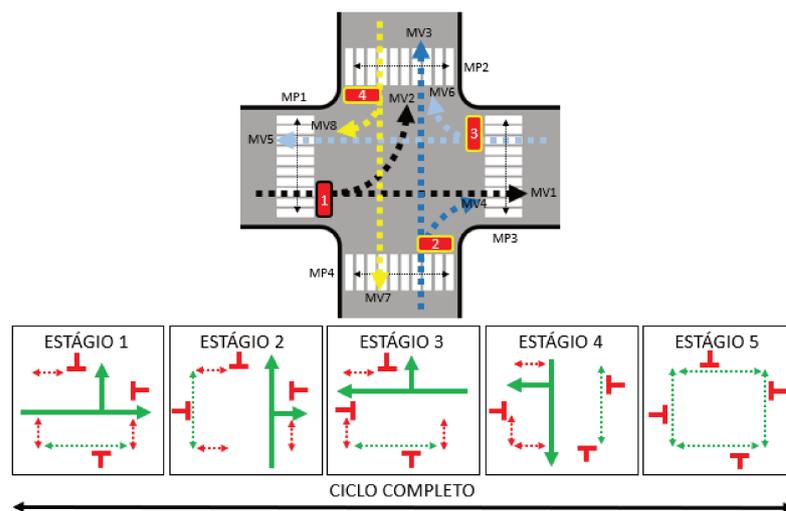
Figura 2.5 – Interseções em “T”.



(a) MU/MU



(b) MU/MD



(c) MD/MD

Figura 2.6 – Interseções em "Cruz".

## 2.3 Sistema semafórico

Com origem na Grécia antiga, a palavra *semaphoros* é a união de *sema* (sinal) com *phoros* (que leva), isto é, um aparelho de sinalização (OXFORD, 2019). Criado por John Peake Knight, o primeiro semáforo do mundo foi instalado em 1868 num cruzamento da cidade de Londres (BBC, 2009). Desde sua criação até os dias de hoje seu propósito permanece o mesmo, controlar o fluxo de veículos. Porém o que vem mudando constantemente são como os semáforos controlam tal fluxo.

### 2.3.1 Semáforos tradicionais

Os tradicionais sistemas semafóricos operam basicamente com a sua base de tempo estática, isto é, configura-se manualmente o tempo em que cada lâmpada ficará acesa (BANI YOUNES; BOUKERCHE, 2016). Sua configuração individual pode ser feita ou por um operador profissional, ou por uma rede de comunicação cabeada, conectando cada semáforo da cidade a um único local, a central de gestão do sistema semafórico. As vantagens dos sistemas semafóricos convencionais são:

- Simplicidade, pois trata-se apenas de um circuito de acionamento de lâmpadas temporizado;
- Quando possuem sistema de atualização remota de sua base de tempo, ela é feita via cabo, o que garante a conexão física entre o semáforo e a central (NETO, 2016; CONTRAN, 2014; AZEREDO, 2014).

Porém suas desvantagens são:

- Possuem base de tempo estática, ou seja, não levam em consideração o fluxo de veículos atual passando pela via. Com isso, não otimiza o tempo em que cada lâmpada fica acesa, ocasionando desperdício de tempo, possibilitando engarrafamentos além de aumentar a emissão de gases poluentes à atmosfera (BORIBOONSOMSIN; BARTH, 2008);
- Embora a conexão física, via cabo, garanta a conexão entre o semáforo e sua central, se tratando de grandes centros urbanos, o comprimento desses cabos pode chegar a milhares de quilômetros. De acordo com a Companhia de Engenharia e Tráfego (CET) da cidade de São Paulo, para uma completa revitalização semafórica da cidade seriam necessários 2520 km de cabos elétricos (CET, 2013a). E ainda segundo a CET, 11 % das ocorrências que geram a inoperância do sistema de sinalização da cidade são devido à desgastes do cabeamento e umidade (conforme a Figura 2.7) e cerca de 13 % devido à agentes externos como o roubo dos próprios cabos e vandalismo (CET, 2013b).



Figura 2.7 – Cabos de controle e comunicação de sistemas semafóricos em condições de má preservação (CET, 2013b).

Segundo (AZEREDO, 2014), o rompimento de um cabo de comunicação semafórica (linha telefônica ou por fibra óptica) pode comprometer o sincronismo do sistema semafórico inteiro, sendo necessárias de uma à três horas para a sua correção, pois dependerá de recursos como o agendamento de um caminhão com a plataforma de manutenção, bem como da retirada e inserção dos novos cabos de comunicação, podendo se encontrar ou por vias aéreas ou no subsolo das rodovias. Em um sistema semafórico sem fio, a equipe de manutenção faria seu trabalho apenas no controlador eletrônico de cada semáforo, sem a necessidade de realizar a busca por cabos danificados.

### 2.3.2 Semáforos inteligentes

De forma a sanar os problemas encontrados em sistemas semafóricos convencionais, surge o conceito de semáforos inteligentes. Os semáforos inteligentes são dispositivos eletrônicos que realizam a gestão de tráfego de veículos e pedestres de forma dinâmica, ou seja, realiza o ajuste dos tempos das luzes verde, amarela e vermelha de acordo com a real necessidade. Para efetuar o controle do tráfego de forma dinâmica o semáforo necessita extrair as características que tornam o trânsito de veículos e de pedestres perigoso e congestionado (NETO, 2016). Assim, o semáforo pode extrair tais informações por meio de sensores que podem ser:

- Partes constituintes do circuito controlador do semáforo (JAGADEESH et al., 2015; LAHADE; HIREKHAN, 2015);

- Podem ser oriundos de outro dispositivo ou aplicação que se encontra na mesma rede de comunicação do sistema de gestão semafórica, como os dados fornecidos de aplicações de IoV (CHEN et al., 2018);
- Em ambas situações, ou seja, tanto no semáforo quanto na infraestrutura de rede.

A primeira configuração, com sensores embarcados no próprio controlador do semáforo, é ideal para soluções únicas, em que, ou não há mais aplicações em *smart city*, ou que devido a diferença entre as tecnologias/fabricantes das aplicações, não há uma completa integração entre os diversos sistemas de comunicação. Nesse caso, (AZEREDO, 2014) recomenda que os controladores semafóricos que fazem parte do sistema de gestão semafórica sejam do mesmo fabricante, evitando problemas de incompatibilidade.

Sistemas semafóricos que utilizam a informação proveniente da infraestrutura da rede de comunicação de um sistema de gestão central são ideais para soluções que necessitam de simplicidade de circuito eletrônico e redução de custos financeiros. Dessa forma os semáforos agem como atuadores e detetores de veículos (oriundos de outras aplicações em cidades inteligentes) agem como sensores, para juntos gerirem o trânsito urbano.

Por fim, sistemas que possuem ambas soluções, permitem não só extrair as informações por meio do semáforo local, mas também fazer uso das diversas outras aplicações em cidades inteligentes.

Em geral, as características extraídas do tráfego de veículos são:

- Quantidade de veículos que passam pela via;
- Velocidade dos veículos.

Através da contagem dos veículos que passam por cada via de um cruzamento, é possível estabelecer algoritmos de prioridades (RANI et al., 2018). Sabendo-se a velocidade com que um carro atravessa o semáforo, também é possível calcular o tempo necessário para que o mesmo alcance o próximo semáforo e o encontre aberto (WEI et al., 2018).

A Figura 2.8 exemplifica os diversos aprimoramentos encontrados em sistemas semafóricos inteligentes.

Os pesquisadores WANG et al. propuseram o desenvolvimento de um sistema de sensores magnéticos para serem instalados na lateral das estradas, a fim de realizar a detecção de veículos. Além dos sensores, o sistema possui também a capacidade de se comunicar por meio de um protocolo de comunicação baseado no padrão IEEE 802.15.4 (WANG et al., 2018). Por fim, os autores propõe o uso do sistema para situações que necessitam de baixa complexidade de instalação, processadores com baixa capacidade de



Figura 2.8 – Composição de um semáforo inteligente.

processamento e baixo custo financeiro, porém relativamente à precisão na detecção de veículos, o sistema apresentou um erro de detecção de veículos de 15,3 %.

Conforme (RANI et al., 2018), outra forma de realizar a detecção de veículos com baixa complexidade de instalação e baixo custo seria realizando a detecção de veículos por meio de sensores de *Infrared* (IR) criando uma barreira óptica, de modo que quando houver a obstrução da barreira óptica, o sistema embarcado, por meio de um algoritmo, calcula o novo valor do período de luz verde dos semáforos da interseção. Os tempos das luzes verdes serão maiores para a via congestionada e iguais para os casos em que há congestionamentos em ambas vias do cruzamento. A divisão do tempo é totalmente baseada nos dados de entrada dos sensores IR. O sistema embarcado possui a capacidade de se comunicar por meio do protocolo de comunicação Wi-Fi, baseado no padrão IEEE 802.11. Embora o autor considere o sistema como sendo de baixo custo, ele utiliza um Raspberry Pi como sistema embarcado (com alta capacidade de processamento) e a disposição dos sensores de IR ocasiona em uma alta taxa de erros de contagem de veículos quando há a obstrução de outros objetos pela barreira óptica.

Outra forma de medir o fluxo veicular é através de câmeras digitais. No trabalho (QI; ZHOU; LUAN, 2016), tanto câmeras digitais, quanto *loops* indutivos foram utilizados para não só efetuar a detecção dos veículos que cruzam o cruzamento, mas também para coletar informações sobre acidentes, incluindo sua ocorrência, posição e liberação. Após efetuar a coleta de ambos sensores, esses sinais foram utilizados num sistema de controle semafórico emergencial para interseções sujeitas à acidentes de trânsito. Diferentemente dos trabalhos (WANG et al., 2018; RANI et al., 2018), os pesquisadores QI; ZHOU; LUAN fizeram o uso de sensores mais caros e de sistemas mais complexos, porém segundo os

autores o sistema apresentou vantagens significativas na gestão de acidentes e prevenção de engarrafamentos de trânsito, em comparação com os semáforos tradicionais.

A capacidade de informar as condições de funcionamento, se as lâmpadas estão queimadas ou há falhas no sistemas de comunicação e/ou controle, permitem a ação imediata da central de gestão em realizar os procedimentos de manutenção. Além de eliminar os problemas relacionados a comunicação cabeada (AZEREDO, 2014), os semáforos inteligentes buscam integrar-se em redes de comunicação sem fio, de forma a facilitar a iteração com as demais aplicações em cidades inteligentes.

Os autores (MEGALINGAM et al., 2011), desenvolveram um sistema controlador de tráfego baseado em informações dos nós de uma rede de sensores sem fio (WSN) com o intuito de não apenas executar o roteamento de tráfego eficiente, mas também rastrear veículos em alta velocidade. Porém nesse caso, os autores não implementaram nenhum sistema semaforico real, apenas possíveis trocas de dados entre os nós da WSN e uma estação de monitoramento central (CMS). Baseados em dados extraídos de WSN (RIDA et al., 2018) propuseram um método de controle adaptativo semaforico, embora os autores concluem que o método reduz o tempo de espera de veículos, o trabalho opera apenas em interseções isoladas. Projetado para controlar múltiplas interseções, em seu trabalho (ZHOU; CAO; WU, 2011) desenvolveram um controle de semáforos baseado na coleta de diversos tipos de dados por meio de WSN. Embora o trabalho enfatize o desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerir várias interseções em tempo real, os autores testaram o seu método apenas em interseções de mão dupla (MD) nos dois sentidos, isto é, em interseções CRUZ-MD/MD. Com a proposta do trabalho atual, a inserção de diversos semáforos em diversos tipos de interseções seria simplificada, podendo expandir a análise de (ZHOU; CAO; WU, 2011) para outros tipos de interseções.

Em seus vários trabalhos, CUNHA realizou o desenvolvimento de um sistema de comunicação sem fio para o controle e gestão de tráfego (CUNHA, 2016; CUNHA et al., 2016; CUNHA et al., 2016; CUNHA; CARDEIRA; MELICIO, 2016). A troca de informações entre os semáforos localizados na interseção foi feita pelo uso do protocolo de comunicação ZigBee, porém a comunicação entre a interseção e central de gestão, comunicação de longo alcance, foi implementada pelo uso da tecnologia de comunicação LoRaWAN. (SILVA, 2018) também utilizou o protocolo ZigBee em um sistema inteligente de semáforos. Apesar dele apresentar diversos cálculos de operação semaforica que dependem do número de veículos que circulam pelo cruzamento, em seu sistema não há sensores de detecção de veículos, em vez disso ele considerou tanto valores aleatórios, quanto determinísticos. Seu trabalho abordou apenas um tipo de interseção.

Existem também linhas pesquisa que visam desenvolver sistemas de emergência para interseções com acidentes, conforme (QI; ZHOU; LUAN, 2016). Sua estratégia de controle é baseada em Redes de Petri (PN) e em seu sistema os semáforos não podem

apenas serem controlados, mas também são capazes de controlar as outras instalações, incluindo *loops* indutivos e luzes de advertência. (SHAAMILI; RANJITH; SUPRIYA, 2018; PUVIARASI et al., 2018; KHEKARE, 2014) desenvolveram sistemas eletrônicos para realizar comunicação entre semáforos e veículos de emergência, e permitir controlar o cruzamento para priorizar a passagem de ambulâncias e viaturas policiais. Ao invés de construir uma infraestrutura para permanecer posicionada ao lado de um semáforo e cambiar informações com os veículos, como em (SHAAMILI; RANJITH; SUPRIYA, 2018), o presente trabalho propõe que o próprio semáforo seja capaz de se comunicar por uma rede sem fio com uma central de gestão. SUNDAR; HEBBAR; GOLLA fizeram a contagem de veículos por identificação por radiofrequência (RFID) para estimar o tempo necessário de luz verde para os semáforos. Nesse caso ele utilizou o protocolo ZigBee para realizar a troca de informações à curtas distâncias entre os veículos da avenida com os semáforos, propondo até realizar o acionamento das autoridades policiais para o caso de detecção de veículos roubados (SUNDAR; HEBBAR; GOLLA, 2015). Embora o artigo detalhe o funcionamento da identificação por RFID, os autores SUNDAR; HEBBAR; GOLLA não detalharam o sistema de comunicação entre os semáforos. Logo, o atual trabalho, por meio da intervenção direta da central de gestão nos cruzamentos, poderia criar rotas seguras específicas para o caso de haver a detecção de um veículo roubado seguido de uma perseguição policial.

## 2.4 Redes sem fio

As tecnologias de comunicação sem fio estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas. Em se tratando de tais tecnologias em aplicações IoT e cidades inteligentes, existem diversos problemas que devem ser observados e considerados no momento do projeto de tais sistemas. Uma vez que a informação é enviada (na forma de um sinal de origem eletromagnética) para o ar, para que o sinal alcance o seu destino é necessário se atentar para as formas de minimizar possíveis interferências, bem como escolher as características técnicas do módulo de RF que melhor se adéque a determinada aplicação. Portanto, de acordo com (TEXAS INSTRUMENTS, 2013), os fatores que influenciam no alcance dos sinais de RF são:

- Potência de saída do transmissor TX: quanto maior for a potência de saída do transmissor, maior será o alcance do sinal de RF. Em geral, um estágio de *Power Amplifier* (PA) é inserido na saída do módulo de rádio. Porém a potência de saída máxima é limitada por regulações regionais;
- Frequência RF: em termos gerais, quanto menor for a frequência do sinal de RF, maior será o seu alcance;

- Co-existência: capacidade do receptor de ter um bom desempenho em ambientes com várias fontes de interferência RF;
- Ambiente: se a aplicação opera em ambientes internos, externos, visada direta ou possui obstáculos;
- Sensibilidade do receptor RX: em rádios digitais, trata-se da capacidade de um receptor de identificar e amplificar sinais em sua entrada;
- Desempenho da antena: a antena a ser utilizada para a transmissão e recepção dos dados deve ser projetada para atuar na aplicação desejada, pois no caso da utilização de uma antena genérica especificada apenas para operar na frequência de interesse, devido às questões ambientais, o seu desempenho poderá ser prejudicado e conseqüentemente diminuindo o alcance do sinal de RF.

Ao realizar o projeto de uma aplicação IoT atentando-se para os fatores listados anteriormente, diminuir-se-á as causas de falha de comunicação dos sinais de RF.

Ao abordar as redes sem fio no que diz respeito à sua topologia, para cada tipo de tecnologia pode haver um ou mais tipos de topologia possíveis de ser implementado. Conforme em (CUNHA, 2016), as principais topologias utilizadas em aplicações de IoT são: árvore, estrela, ou *mesh*. Cada dispositivo em uma rede é chamado de nó e no caso de uma rede com topologia em estrela, toda informação é fornecida por um só nó, chamado de nó coordenador, central da rede que distribui os dados, numa rota única, para cada nó restante. Diferentemente da topologia em estrela, numa rede do tipo *mesh*, os dados enviados pelo coordenador da rede possuem mais de uma rota possível para chegar ao nó de destino, chamado de nó ou dispositivo final.

Além da topologia de rede, a forma como os dispositivos coordenador e final trocam informações, as máximas taxas de transmissão de dados e as frequências de operação são específicas para cada tecnologia. Logo, as subseções seguintes abordarão as principais tecnologias de comunicação sem fio adotadas em aplicações de IoT.

### 2.4.1 ZigBee

O IEEE desenvolveu um padrão para dispositivos de comunicação de dados usando transmissões de RF de curto alcance com baixa taxa de dados, baixa potência e baixa complexidade em uma rede de área pessoal sem fio (WPAN), conhecido como IEEE 802.15.4 (IEEE, 2016). Baseadas no padrão IEEE 802.15.4, diversas empresas de desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio implementaram protocolos de comunicação para a troca de dados em uma Redes de Sensores Sem Fio (RSSF).

A ZigBee Alliance é uma associação de empresas de diferentes segmentos do mercado que desenvolveu protocolos de comunicação baseados na camada física e de *link*

de dados do padrão IEEE 802.15.4 com a intenção de se tornar uma plataforma universal para a implementação de RSSF. O protocolo, denominado de ZigBee, possui vantagens como a segurança na transmissão de dados, suporte para RSSF complexas, baixo consumo de energia e com capacidade de endereçar até 65536 dispositivos na mesma rede. Embora o tamanho máximo teórico de uma rede Zigbee seja superior a 65000 nós, na prática, os problemas relacionados à largura de banda e atrasos nos quais o crescimento da rede pode incorrer devem ser considerados, restringindo o seu horizonte de aplicações, além disso ele possui taxa de transmissão de dados máxima de até 250 kbps (limite estipulado pelo padrão IEEE 802.15.4) (PROSKOCHYLO et al., 2015). O ZigBee opera em 2,4 GHz, dentro das bandas de frequências não-licenciadas, *Industrial, Scientific and Medical* (ISM). Um dos principais problemas encontrados nas redes ZigBee é, devido ao ZigBee possuir uma abordagem em camadas, há uma sobrecarga considerável nas mensagens trocadas entre as camadas do protocolo com uma diminuição do período de transmissão de mensagens pelos nós, limitando a recepção de mensagens (PINEDO-FRAUSTO; GARCIA-MACIAS, 2008). Para aplicações industriais críticas o tempo de atraso é um fator muito importante da rede, sendo que para o ZigBee o atraso na transmissão das mensagens não é causado pelo aumento da carga útil (conhecida como *payload*), mas sim na criação de seus cabeçalhos (PINEDO-FRAUSTO; GARCIA-MACIAS, 2008).

## 2.4.2 LoRaWAN

A tecnologia *Long Range* (LoRa) é uma outra solução utilizada em RSSF. Trata-se de uma técnica de modulação de dispersão espectral capaz de realizar a troca de dados em longas distâncias sob baixas taxas de transferência de dados. Já o LoRaWAN refere-se ao protocolo de comunicação aberto para a classe de redes sem fio *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) que faz uso da modulação LoRa (camada física), operando nas bandas ISM de 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz (ALI et al., 2019). Sua grande vantagem está no alcance da transmissão de dados, chegando até 10 km de distância. Porém, para alcançar tais distâncias a taxa de transferência máxima é limitada em até 27 kbps (LoRa) ou 50 kbps (FSK). De acordo com (ADELANTADO et al., 2017), embora o desempenho do LoRaWAN seja determinado pelas camadas PHY e de MAC, os regulamentos do ciclo de trabalho máximo (definido como a porcentagem máxima de tempo durante o qual um dispositivo final pode ocupar um canal) nas bandas ISM surgem como um fator limitante. Para que não haja a sobrecarga da rede e portanto reduzir a probabilidade de erros de transmissão, para uma rede com 5000 dispositivos finais em média cada dispositivo deve gerar até 2 pacotes de dados por dia (BANKOV; KHOROV; LYAKHOV, 2016). Logo, para aplicações que necessitam de uma maior demanda de pacote de dados por dia, o LoRaWAN torna-se incapaz de ser utilizado.

### 2.4.3 Bluetooth low energy

Com o propósito de suprir a demanda de aplicações IoT que necessitam operar sob baixo consumo de energia elétrica, curto alcance e alta taxa de transferência de dados, a Bluetooth SIG reprojeteu sua própria tecnologia para criar o protocolo de comunicação *Bluetooth Low Energy* (BLE). Diferentemente de suas versões anteriores que possuíam taxas de transferências de dados de até 3 Mbps, o BLE opera em no máximo 1 Mbps, porém é capaz de operar até a metade da potência do Bluetooth clássico (JEON et al., 2018). Operando em 2,4 GHz, divide sua banda em quarenta canais, três dedicados para operar na descoberta e estabelecimento de conexão com os demais dispositivos (dispostos em canais adjacentes aos canais do padrão Wi-Fi, minimizando possíveis interferências) e o restante para a troca de dados. Entretanto, o número máximo de dispositivos ativos na rede depende da aplicação, podendo em alguns casos chegar a cinquenta dispositivos em simultâneo (AFONSO; MAIO; SIMOES, 2016).

### 2.4.4 Wi-Fi

Criado com o propósito de realizar a troca de informações multimídia, como áudio e vídeo, a tecnologia sem fio para *Local Area network* (LAN) Wi-Fi possui acesso de alta velocidade às redes *Internet Protocol* (IP), entre 11 e 54 Mbps. Baseado no padrão IEEE 802.11, o Wi-Fi opera na frequência de 2,4 GHz, possui uma ampla variedade de módulos de hardware, alto nível de padronização e interoperabilidade entre dispositivos Wi-Fi de diferentes fornecedores e segurança dos dados transmitidos (PROSKOCHYLO et al., 2015). Entretanto, apesar de alcançar altas taxas de transferência de dados, o Wi-Fi possui grande consumo de energia elétrica, quando comparado ao BLE e ZigBee, e possui um alcance máximo do sinal transmitido de 100 m. Dessa forma, o seu alto consumo de energia prejudica o seu uso em sistemas alimentados à bateria (PROSKOCHYLO et al., 2015).

## Conclusão

Portanto, após introduzir as diferenças entre os semáforos tradicionais e inteligentes (que realizam, respectivamente, os controles estáticos e dinâmicos do tráfego de veículos), estudar o funcionamento dos principais tipos de interseções semaforizadas existentes (descrevendo os diagramas temporais e de estágios das interseções simples, em “T” e em “cruz”, em todas as suas variações) e definir as vantagens e desvantagens entre as principais tecnologias de rede sem fio associadas ao conceito de IoT (ZigBee, Bluetooth, LoRaWAN e Wi-Fi), é possível prosseguir para a etapa de desenvolvimento do projeto do sistema semaforizado sem fio aplicado às cidades inteligentes.

## 3 Desenvolvimento do projeto

*A elaboração de um projeto onde diversos dispositivos semelhantes que possuem comunicação sem fio realizam tarefas semelhantes em períodos de tempo sincronizados é uma tarefa um tanto quanto complexa, pois para haver o controle, monitoramento e sincronismo entre tais sistemas deve ser elaborado um protocolo de comunicação para realizar a troca de informações entre eles. Nesse sentido, a abordagem do tema deve ser progressiva, descrevendo as características do hardware utilizado, as funções executadas pelo firmware e o protocolo de comunicação usado pela tecnologia de rede adotada. O Capítulo 3 relata o desenvolvimento de todas as etapas necessárias para o correto funcionamento do sistema proposto, desde os circuitos eletrônicos utilizados, planos de gestão semafórica, rotinas de segurança e até as mensagens utilizadas pelo protocolo de comunicação adotado.*

### 3.1 Composição do projeto

Os autores (WANG et al., 2018) propuseram um sistema detector de fluxo veicular portátil baseado em sensores magnéticos, com uma abordagem de baixa complexidade de instalação e baixo custo. Além disso, sensores de detecção de veículos baseados em câmeras digitais são facilmente afetados pelas mudanças climáticas. Seu sistema é dedicado ao aperfeiçoamento dos semáforos tradicionais, de modo que toda a troca de dados é feita por meio da RSSF ZigBee.

Há trabalhos que visam desenvolver sistemas de emergência para interseções com acidentes, conforme (QI; ZHOU; LUAN, 2016), que efetuaram o controle de semáforos de um cruzamento com quatro direções, isto é, CRUZ-MD/MD. Instalaram-se câmeras em cada cruzamento para detectar a ocorrência de acidentes. De forma a reduzir o consumo de energia, durante o período de luz vermelha, os semáforos mantinham seus sensores de *loop* indutivos em modo *sleep* e só voltavam a operar durante o restante do período de operação semafórico (QI; ZHOU; LUAN, 2016).

Em seu trabalho, (CUNHA, 2016) desenvolveu o circuito eletrônico de acionamento de *Light-Emitting Diode* (LED) por meio de transistores bipolares para um conjunto de quatro GFVs. Embora ele tenha utilizado a RSSF ZigBee para controlar os semáforos do cruzamento e LoRaWAN para se comunicar com a central de controle, o sistema não é capaz de efetuar a leitura do estado de funcionamento das lâmpadas e o seu trabalho abordou apenas a interseção em CRUZ-MD/MD.

Semelhante ao trabalho de CUNHA, (SILVA, 2018) também utilizou o protocolo ZigBee em um sistema inteligente de semáforos. Porém nesse caso, ele utilizou uma placa

de desenvolvimento Arduino para o acionamento de LEDs, ligados por resistores de limitação de corrente diretamente às portas digitais do Arduino. O autor relatou problemas relacionados à insuficiência de memória dinâmica em seu sistema, consumindo 78% da memória (o ATmega328 possui 2 kBytes de *Static Random Access Memory* (SRAM)) apenas com o carregamento das variáveis globais do seu *firmware*. Além de não ter desenvolvido um circuito eletrônico completo dedicado ao controle de semáforos (realizando apenas um experimento na placa de desenvolvimento Arduino), de não possuir qualquer tipo de sensor, novamente abordou-se a operação semafórica em apenas uma interseção em CRUZ-MD/MD.

O sistema semafórico proposto nesta dissertação é composto por três partes: *hardware* (parte física do projeto), *firmware* (parte lógica do projeto) e rede. Cada parte do sistema é subdividida em mais seções, que representam a implementação de uma função específica do sistema. A Figura 3.1 representa o sistema completo.



Figura 3.1 – Composição do sistema semafórico.

Logo, o trabalho propõe a construção de um sistema semafórico sem fio, sem sensores de detecção de fluxo veicular e sem algoritmo de otimização dos tempos dos semáforos. Tal postura é tomada tendo em vista o uso de uma nova rede de comunicação sem fio (rede XMesh), de forma que após a implementação do sistema semafórico proposto, a estrutura desenvolvida permitirá a agregação de tais sensores e algoritmos, proporcionando a elaboração de novas aplicações tecnológicas. Além disso, outra contribuição do presente trabalho está na construção e análise das diversas trocas de mensagens entre os semáforos de diferentes interseções semafóricas e a segurança de operação de todo o sistema.

## 3.2 *Hardware*

O desenvolvimento de novas tecnologias e dispositivos contribuem positivamente para o avanço do conceito de cidades inteligentes. Assim sendo, além de elaborar formas

de mitigar os problemas relacionados a gestão do tráfego rodoviário, propõe-se desenvolver um protótipo capaz de operar nos tipos de interseções descritas no Capítulo 2. A seguir apresentar-se-á os circuitos eletrônicos do protótipo.

De forma a propor um dispositivo eletrônico de baixo custo financeiro, foi elaborado um *hardware* controlador de semáforos com comunicação sem fio. Entende-se por *hardware* controlador, um circuito eletrônico que seja capaz de realizar as seguintes tarefas:

- Acionar lâmpada de alimentação AC e DC;
- Efetuar a leitura do estado de todas as lâmpadas;
- Possuir entrada para o botão de prioridade para pedestres;
- Comunicar-se com a rede por meio de um módulo RF.

O propósito de controlar tanto lâmpadas AC quanto lâmpadas DC é ampliar o horizonte de atuação do sistema semafórico, permitindo que o sistema seja compatível com diversos fabricantes de lâmpadas semafóricas. O circuito controlador de semáforos não será projetado/otimizado para operar em modos de baixíssimo consumo de energia (*ultra low power*), devido ao semáforo ser um dispositivo que permanece constantemente ligado à rede elétrica e que pode controlar lâmpadas de 60 à 100 W. De forma a simplificar o desenvolvimento do circuito do semáforo, considerou-se uma fonte externa DC para alimentar as lâmpadas DC. A arquitetura de alto nível do sistema eletrônico pode ser vista na Figura 3.2.

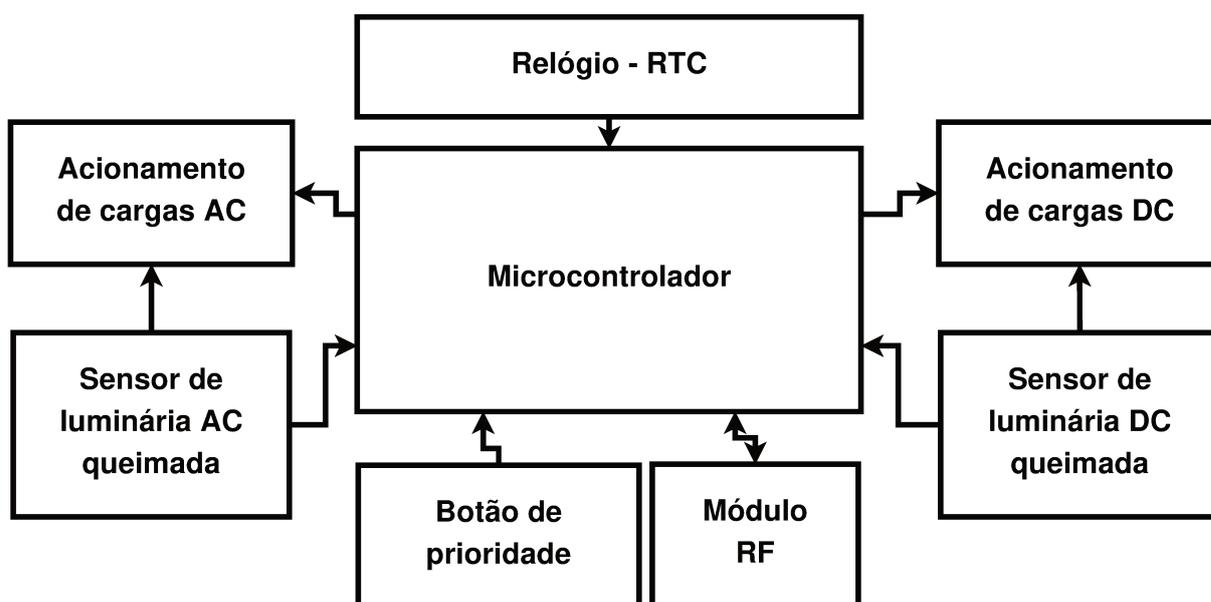


Figura 3.2 – Arquitetura de alto nível do circuito eletrônico semafórico.

A ideia de possuir um bloco controlador, um atuador e um de comunicação foi baseada nos trabalhos (CUNHA, 2016) e (SILVA, 2018). A arquitetura de alto nível exposta na Figura 3.2 está presente em cada semáforo do sistema proposto, de modo que as seções seguintes abordarão cada bloco constituinte do diagrama de forma detalhada.

### 3.2.1 Circuito eletrônico do microcontrolador

É o principal circuito eletrônico do projeto do semáforo. É responsável por realizar o ajuste dos tempos das lâmpadas, efetuar as leituras dos circuitos sensores, comunicar com o módulo de RF, interpretar o protocolo de comunicação da rede e realizar as rotinas de segurança do sistema. Existem diversos fabricantes de microcontroladores com diversas características. Como requisitos de projeto, o microcontrolador ideal deve possuir periféricos temporizadores (*timers*) acionados por interrupção, interface de comunicação serial (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (USART)), relógio de tempo real (*Real Time Clock* (RTC)), pinos de *General Purpose Input/Output* (GPIO) suficientes para ler e atuar um GFV (AC/DC) e um GFP (AC/DC), e que opere em ambientes à altas temperaturas. Para tal, foi utilizado um microcontrolador da *STMicroelectronics*, com núcleo ARM Cortex-M3 com arquitetura de 32 bits (arquitetura bem estabelecida entre sistemas microcontrolados e embarcados) (STMICROELECTRONICS, 2015), conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas do microcontrolador utilizado.

Parâmetro	Valor
Tensão de operação	3,3 V
Frequência de relógio	72 MHz
Memória flash	64 kBytes
Memória SRAM	20 kBytes
GPIO	37
USART	3
<i>Timer</i>	4
RTC	1
Temperatura máxima de operação	125 °C

O periférico RTC é de suma importância para o projeto, pois será através dele que será realizado o sincronismo entre os semáforos de sucessivos cruzamentos. A função do periférico USART é estabelecer a comunicação entre o microcontrolador e o módulo de RF. Os *timers* serão utilizados para gerar a base de tempo para as rotinas de segurança. A temperatura máxima de operação de 125 °C permite o microcontrolador permanecer exposto às condições temporais de sol e chuva, pertencentes ao ambiente de trabalho de um semáforo. Por fim, a memória *flash* irá abrigar o *firmware* do sistema semaforico, com todas interseções analisadas na Seção 2.2, sendo o espaço disponível no microcontrolador



### 3.2.2 Sensor de corrente DC

Com a função de realizar o controle e a medição de tensão de luminárias com alimentação DC, como por exemplo dispositivos LEDs, esta subseção descreve o circuito eletrônico completo que implementa a função dos blocos “Acionamento de cargas DC” e “Sensor de luminária DC queimada” da arquitetura de alto nível do sistema, visto na Figura 3.2.

O acionamento de cargas DC é comumente feito por meio de um dispositivo transistor, capaz de operar em dois modos: amplificação (região ativa) ou chaveamento (regiões de corte e saturação). Dentre os transistores existentes, o transistor *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) pode ser compreendido como uma fonte de corrente controlada por tensão. Desse modo, caso o nível de tensão em seu terminal “porta” seja maior que a tensão de *threshold* (tensão mínima necessária para colocar o MOSFET em condução), libera-se o fluxo de corrente elétrica para carga, acendendo a lâmpada, caso contrário não haverá o fornecimento de corrente elétrica, desligando a lâmpada. Além disso, os níveis de tensão do sinal de acionamento e da carga permanecem isolados.

Semelhante ao bloco de acionamento de cargas DC, o circuito eletrônico que monitora o estado de funcionamento da lâmpada (bloco “Sensor de luminária DC queimada” visto na Figura 3.2) capaz de indicar se a lâmpada está acesa, apagada ou queimada monitora o fluxo de corrente pela carga. Diferentemente do MOSFET, o Transistor Bipolar de Junção (TBJ) pode ser abstraído como sendo uma fonte de corrente controlada por corrente. Logo, ao posicionar ambos circuitos (de acionamento e monitoramento) em cascata, caso o MOSFET esteja em estado de bloqueio a corrente da carga será desviada para a entrada (base) do TBJ levando-o para o estado de condução de corrente em sua saída (coletor). A corrente desviada para a base do TBJ deve ser mínima o suficiente à ponto de manter a lâmpada apagada e fornecer uma corrente de coletor para sua posterior conversão para os níveis de tensão adequados do terminal de entrada do microcontrolador. Desse modo é possível verificar se a lâmpada está queimada, pois se caso ela estiver, não haverá corrente de base para o TBJ, que por sua vez não entrará em condução. Optou-se por ambos circuitos, de acionamento (feito por um MOSFET) e de monitoramento (feito por TBJ), por serem componentes de fácil aquisição e baixo consumo financeiro, não requerendo Circuitos Integrados (CI’s) específicos.

Embasado no conceito supracitado, desenvolveu-se o circuito da Figura 3.4. Nela, além dos circuitos sensores há também os circuitos de acionamento para cada uma das lâmpadas do GFV e do GFP. As trilhas de conexão com os dizeres semelhantes à *DC\_VERMELHO\_SEM*, referem-se ao acionamento *DC* da lâmpada que representa o sinal VERMELHO.

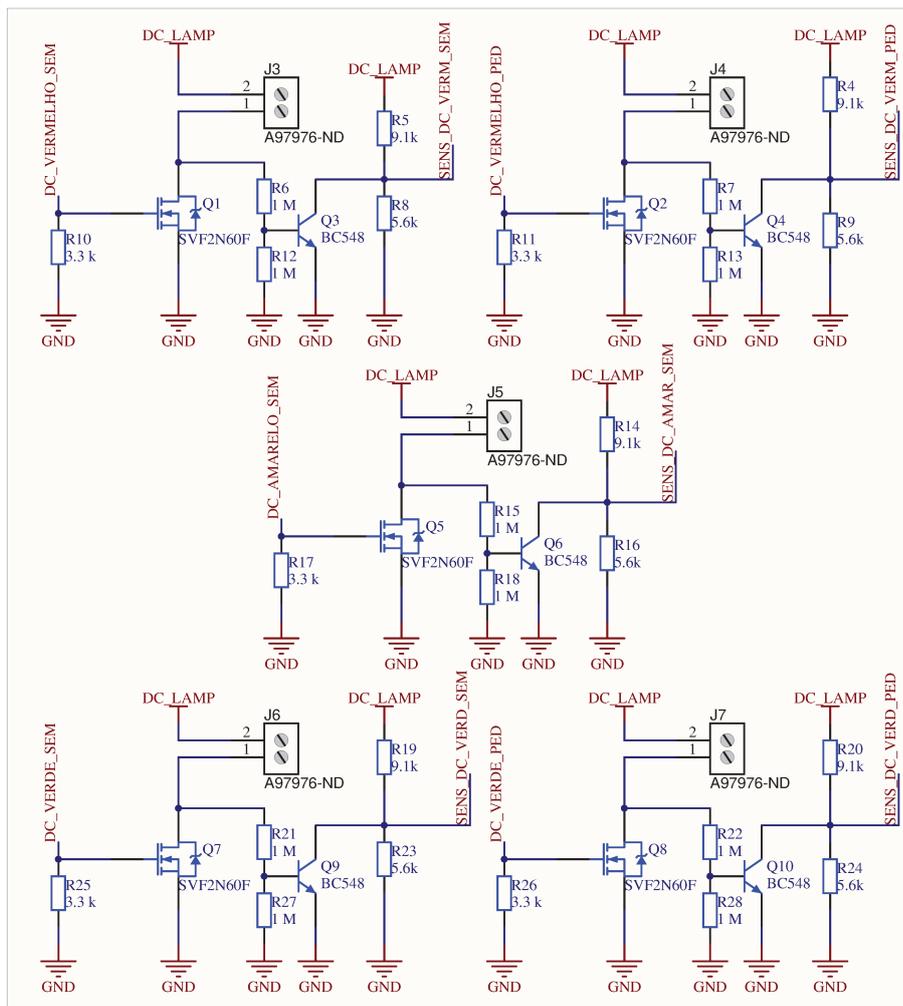


Figura 3.4 – Circuito esquemático do sensor de tensão das luminárias com alimentação DC.

De forma a adequar o sinal de saída do TBJ para os níveis de tensão aceitos pelos pinos de entrada do microcontrolador, inseriu-se um circuito divisor de tensão ajustando os níveis para 0 V e 3,3 V, sendo que no microcontrolador utilizado, os valores de tensão abaixo de 0,8 V são interpretados como nível lógico baixo e os valores de tensão acima de 2 V são reconhecidos como nível lógico alto (STMICROELECTRONICS, 2015). Para analisar o comportamento do circuito, toma-se como exemplo o transistor MOSFET Q1 e o TBJ Q3, ambos do esquemático da Figura 3.4 bem como o conteúdo das Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada DC funcionando normalmente

Entrada	MOSFET	TBJ	Saída	Estado
0 V	Em bloqueio	Em condução	0 V	Lâmpada apagada
3,3 V	Em condução	Em bloqueio	3,3 V	Lâmpada acesa

Após as devidas análises, nota-se que o estado da lâmpada é passível de ser

Tabela 3.3 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada DC queimada

Entrada	MOSFET	TBJ	Saída	Estado
0 V	Em bloqueio	Em bloqueio	3,3 V	Lâmpada queimada
3,3 V	Em condução	Em bloqueio	3,3 V	Lâmpada supostamente acesa

detectado, podendo este ser “lâmpada acesa”, “lâmpada apagada” e no instante em que ela permanecer em bloqueio (MOSFET em bloqueio) se caso o sinal de tensão no divisor de tensão seja de 3,3 V seu estado será de “lâmpada queimada”.

### 3.2.3 Sensor de corrente AC

Em se tratando de uma lâmpada AC cujo controle e monitoramento é feito por um circuito eletrônico DC, o projeto dos circuitos que implementarão os blocos “Acionamento de cargas AC” e “Sensor de luminária AC queimada” presentes na arquitetura de alto nível da Figura 3.2 deve possuir elementos de isolamento elétrica entre os sinais AC/DC.

Uma forma de efetuar a medição de corrente elétrica é inserir um resistor de  $1 \Omega$  em série com a carga, conhecido como resistor *shunt*. Porém nesse caso, o sinal de saída seria uma senoide centrada em 0 V. O trabalho (MIRON-ALEXE, 2016) realizou o monitoramento de corrente através de um Transformador de Corrente (TC), porém embora esse componente possui uma grande faixa de operação linear, o TC é um componente de grandes proporções físicas e para realizar a medição, o fio condutor de corrente elétrica necessita passar por seu interior. Outra forma de medir corrente elétrica é através de um CI, como em (GARCÍA-ORELLANA et al., 2018), que realizou o monitoramento de um sistema solar isolado de bombeamento de água por meio do CI ACS712. Porém o circuito sensor de corrente presente no sistema semafórico limita-se à apenas verificar o estado de funcionamento de seu GFV e GFP. Nesse sentido, o circuito não necessita ser analógico e altamente preciso como no caso do CI ACS712.

Uma forma simples de acionamento de cargas AC através de sinais DC é por meio de relés, entretanto eles podem ocupar um espaço físico maior do que os CIs que possuem o mesmo propósito. (RUDRAWAR et al., 2018) desenvolveram um sistema de iluminação pública inteligente com controle de intensidade de luz usando circuitos de eletrônica de potência. Eles fizeram o acionamento de uma lâmpada AC através de um CI optoacoplador MOC3021 (CI com um LED opticamente acoplado à uma chave bidirecional) e um circuito de detecção de passagem por zero com um CI optoacoplador 4N26 (CI com um LED opticamente acoplado à um fototransistor). Os autores de (YAMMEN; TANG; VENNAPUSA, 2019) utilizaram os mesmos CIs de isolamento óptica para controlar a velocidade de um ventilador inteligente. Portanto devido à ambos circuitos se basearem em CIs optoacopladores (tendo portanto um isolamento óptico



O funcionamento resumido do circuito da Figura 3.5 pode ser analisado por meio das Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada AC funcionando normalmente

Entrada	TRIAC	Saída	Estado
0 V	Em bloqueio	3,3 V	Lâmpada apagada
3,3 V	Em condução	0 V	Lâmpada acesa

Tabela 3.5 – Tabela verdade da lógica de acionamento com a lâmpada AC queimada

Entrada	TRIAC	Saída	Estado
0 V	Em bloqueio	0 V	Lâmpada queimada
3,3 V	Em condução	0 V	Lâmpada supostamente acesa

Após a análise dos circuitos do microcontrolador e dos sensores de corrente DC e AC, realizou-se o desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso (PCI), cujo resultado final é visto na Figura 3.6.

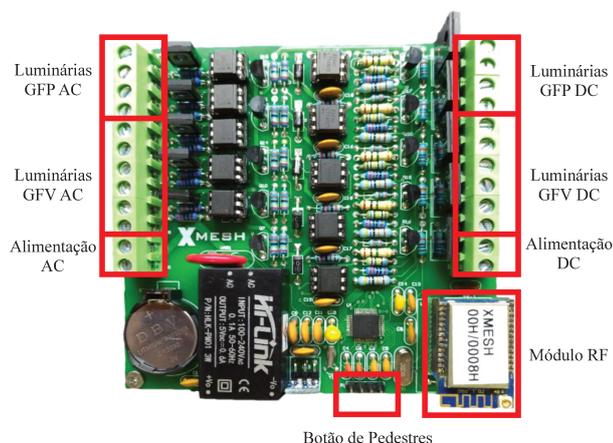


Figura 3.6 – Placa de circuito impresso do sistema semafórico proposto.

O circuito da Figura 3.6, cuja lista de componentes completa encontra-se no Apêndice B, permite o controle de um único semáforo, contendo um grupo focal veicular (verde, amarelo e vermelho) e um grupo focal de pedestres (verde e vermelho) e possui uma entrada para botão de pedestres (botoeira) (OLIVEIRA; MANERA; LUZ, 2019). O protótipo controlador de semáforos visto na Figura 3.6 possui o formato de um quadrado de 10 cm de lado e uma altura máxima de 3 cm, isso permite sua instalação no interior dos GFV, pois de acordo com (CONTRAN, 2014) só o diâmetro de cada foco semafórico possui 20 cm. Assim o protótipo poderia se situar no interior de um GFV, dificultando sua identificação e, por conseguinte, reduzindo atos de vandalismo.

### 3.2.4 Custo do protótipo

O custo total do projeto de dez controladores semafóricos (para a realização dos testes) incluindo a confecção da placa, componentes eletrônicos e o módulo RF foi de US\$ 19,76 por controlador. De forma a comparar os valores dos preços de venda entre fabricantes nacionais de sistemas controladores semafóricos, reuniu-se os dados de três controladores de modelos e empresas diferentes, conforme a Tabela 3.6. O controlador da empresa CONTRANSIN é capaz de operar tanto no modo isolado, quanto em modo de controle centralizado, além de poder ser atuado com botoeira ou laço indutivo (CONTRANSIN, 2019). Já os controladores de 8 fases de controle fixo e adaptativo são ambos da empresa Arc sinalização (ARC, 2019).

Tabela 3.6 – Comparação dos preços de venda de diferentes controladores semafóricos

Descrição	Valor
CONTRANSIN de 5 fases	US\$ 1404,76
Controle fixo de 8 fases	US\$ 4759,52
Controle adaptativo de 8 fases	US\$ 7332,63

Cada fase descrita na Tabela 3.6 é referente ao controle máximo de interseções semafóricas em simultâneo. Logo, o custo do protótipo equivalente à cinco e oito interseções em CRUZ-MD/MD (com quatro semáforos) seria de US\$ 395,2 e US\$ 632,32, respectivamente. Desse modo, o preço de venda mínimo deve ser maior do que o dobro do custo total, isto é, de US\$ 790,40 e US\$ 1264,64, ambos inferiores aos controladores comerciais. Portanto, o protótipo proposto neste trabalho apresenta-se como uma alternativa de baixo custo financeiro para o controle centralizado de tráfego urbano.

## 3.3 Firmware

A lógica de programação deve seguir alguns requisitos de projeto de forma a realizar o uso dos recursos disponíveis da infraestrutura de rede disponível. Ao conectar o semáforo na energia elétrica, ele sempre irá executar as rotinas de inicialização, verificação do tipo de comunicação semafórica e verificação de onda verde, conforme a Figura 3.7.

A Figura 3.7 exhibe as rotinas básicas do *firmware* do sistema semafórico, sendo que todos os dados relacionados aos tempos de cada lâmpada, tipo de interseção urbana, se o semáforo é mestre ou escravo e se possui onda verde serão enviados através do protocolo de comunicação entre o semáforo e a central de gestão, dispositivo que possui todos os dados de todos os semáforos da rede. Desse modo, as seções seguintes são dedicadas a explicar sobre as rotinas presentes na Figura 3.7, o protocolo de comunicação (e todas as suas funcionalidades) entre o controlador semafórico desenvolvido e a rede de comunicação sem fio e as demais.

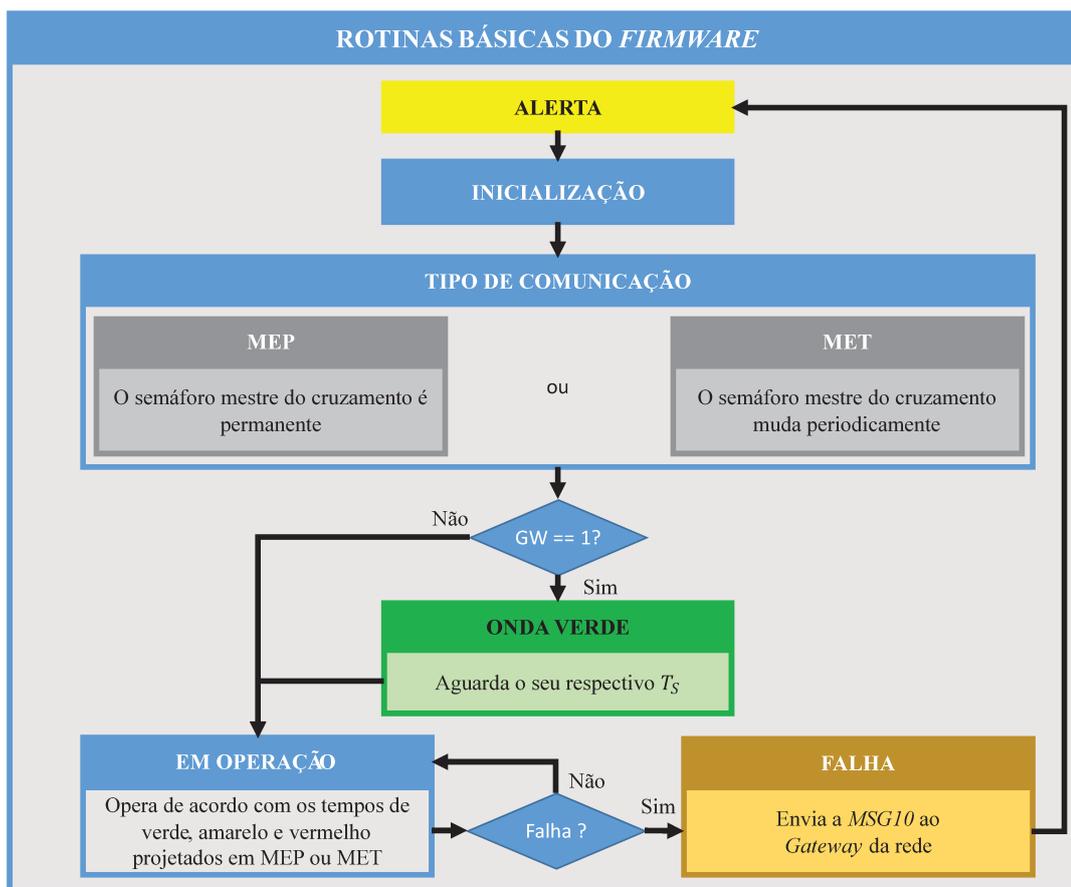


Figura 3.7 – Arquitetura de alto nível do *firmware* do sistema semafórico.

### 3.3.1 Mensagens utilizadas

O protocolo de comunicação a ser utilizado baseia-se na troca de mensagens/pacotes entre o dispositivo final e o coordenador (*gateway*) da rede. Entende-se como dispositivo final o protótipo desenvolvido (vide o Capítulo 3.2) e coordenador o dispositivo que gerencia as mensagens trocadas com o protótipo e o banco de dados, que contém a informação de todos os semáforos da rede. Como *gateway* do sistema é utilizada a placa de desenvolvimento BeagleBone Black, com o sistema operacional Linux gerindo as consultas no banco de dados da rede local.

Todas as mensagens utilizadas na comunicação entre os semáforos e o *gateway* podem ser vistas na Figura 3.8, sendo o quadro de dados limitado a 10 bytes por pacote.

Assim foram adicionados ao protocolo M4IoT (LUZ; MANERA; DONATTI, 2017; LUZ; MANERA; DONATTI, 2019a; LUZ; MANERA; DONATTI, 2019b; OLIVEIRA; LUZ; MANERA, 2020) todos os comandos necessários para a operabilidade do sistema semafórico, sendo elas listadas abaixo:

- A definição de cada uma das mensagens que necessitam de resposta (estilo *Transmission Control Protocol* - TCP) são:

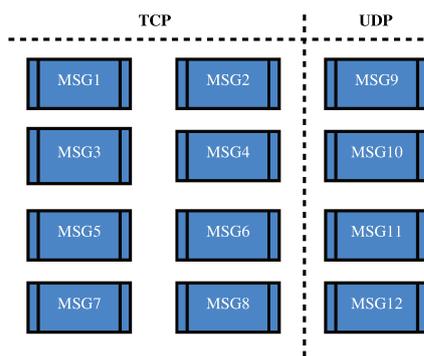


Figura 3.8 – Protocolo de comunicação semafórica.

- Mensagem 1 (*MSG1*)<sup>1</sup>: requisição de configuração do semáforo;
- Mensagem 2 (*MSG2*): resposta à requisição de configuração do semáforo;
- Mensagem 3 (*MSG3*): atuação semafórica, que espera uma resposta *MSG4*;
- Mensagem 4 (*MSG4*): resposta à atuação semafórica *MSG3*;
- Mensagem 5 (*MSG5*): leitura semafórica, que espera uma resposta *MSG6*;
- Mensagem 6 (*MSG6*): resposta à leitura semafórica *MSG5*;
- Mensagem 7 (*MSG7*): requisição de configuração de onda verde;
- Mensagem 8 (*MSG8*): resposta à requisição de configuração de onda verde;
- Já a definição das mensagens que não necessitam de resposta (estilo *User Datagram Protocol* - UDP) são:
  - Mensagem 9 (*MSG9*): envio de dados;
  - Mensagem 10 (*MSG10*): falha semafórica;
  - Mensagem 11 (*MSG11*): atualização da onda verde;
  - Mensagem 12 (*MSG12*): atualização do tempo de operação do semáforo.

O uso de cada mensagem é específico para cada situação analisada, podendo ser utilizada do semáforo para o *gateway* ou vice versa.

Ao estudar os tipos de cruzamentos à serem implementados, é possível tratar cada semáforo constituinte de um determinado cruzamento como sendo mestre ou escravo, onde ambos possuem quatro estados: verde, amarelo, vermelho e estágio pedestre.

O semáforo mestre fornece o instante em que os escravos devem mudar de estado. Já o semáforo escravo repassa as mensagens vindas do mestre.

Portanto com esse tipo de abordagem, a informação mínima que cada semáforo deverá possuir será:

<sup>1</sup> A nomenclatura dos comandos foi simplificada por questões de segurança e patentes solicitadas.

- Se ele é mestre ou escravo no cruzamento;
- O número de escravos que ele possui, no caso dele ser mestre;
- Os tempos para os grupos focais veicular e pedestre;
- O endereço do próximo semáforo no cruzamento;
- O tipo de cruzamento em que ele se encontra.

Todas essas configurações descritas anteriormente são realizadas no momento em que o semáforo recebe sua primeira resposta do coordenador da rede. Porém por questões de segurança, desde o momento em que o semáforo recebe a alimentação da rede elétrica ele permanece no modo de ALERTA, isto é, permanece com os focos amarelo veicular e vermelho pedestre nos modos intermitentes. O semáforo só sairá da rotina de ALERTA caso o processo da seção seguinte seja concluído com sucesso.

Através de comandos enviados pelo *gateway*, o usuário pode controlar todos os semáforos online na rede, conforme a Figura 3.9. Todas as informações dos semáforos cadastrados na rede permanecem armazenadas em forma de um banco de dados no *gateway*, que realiza a atualização de suas tabelas de dados periodicamente. Portanto, o usuário tem acesso à todos os possíveis problemas de todos os semáforos. A inteligência do sistema proposto está tanto na capacidade de cada semáforo poder ser configurado automaticamente (com base nos dados cadastrados no *gateway*), tendo apenas que ser conectado à rede elétrica, quanto na capacidade de detectar o mau funcionamento de semáforos, alertando não só a central de gestão, mas também os motoristas da interseção.

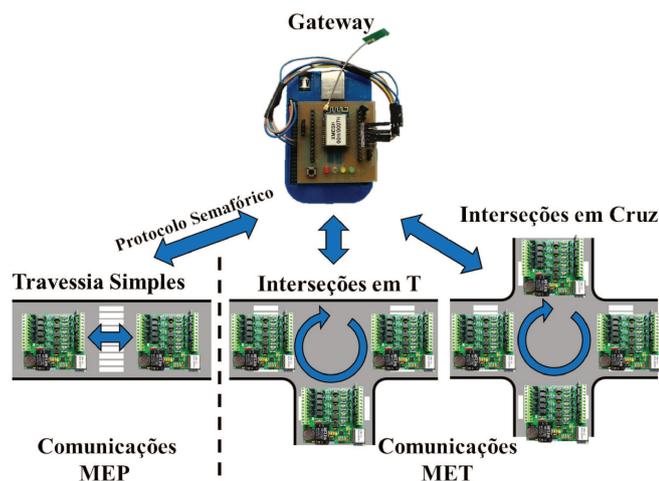


Figura 3.9 – Esquema de funcionamento da rede.

## 3.3.1.1 Comunicação mestre escravo permanentes

Define-se o termo Mestre Escravo Permanentes (MEP) para os semáforos constituintes de cruzamentos simples, isto é, do tipo : SIMPLES-MU, SIMPLES-MD, T-MU/MU 1 e T-MD/MU 1. Pois nesses casos, a mudança de estado dos escravos ocorrem sempre junto com a mudança de estado do mestre. Portanto o fluxograma que descreve a rotina de inicialização de tais semáforos pode ser visto na Figura 3.10.

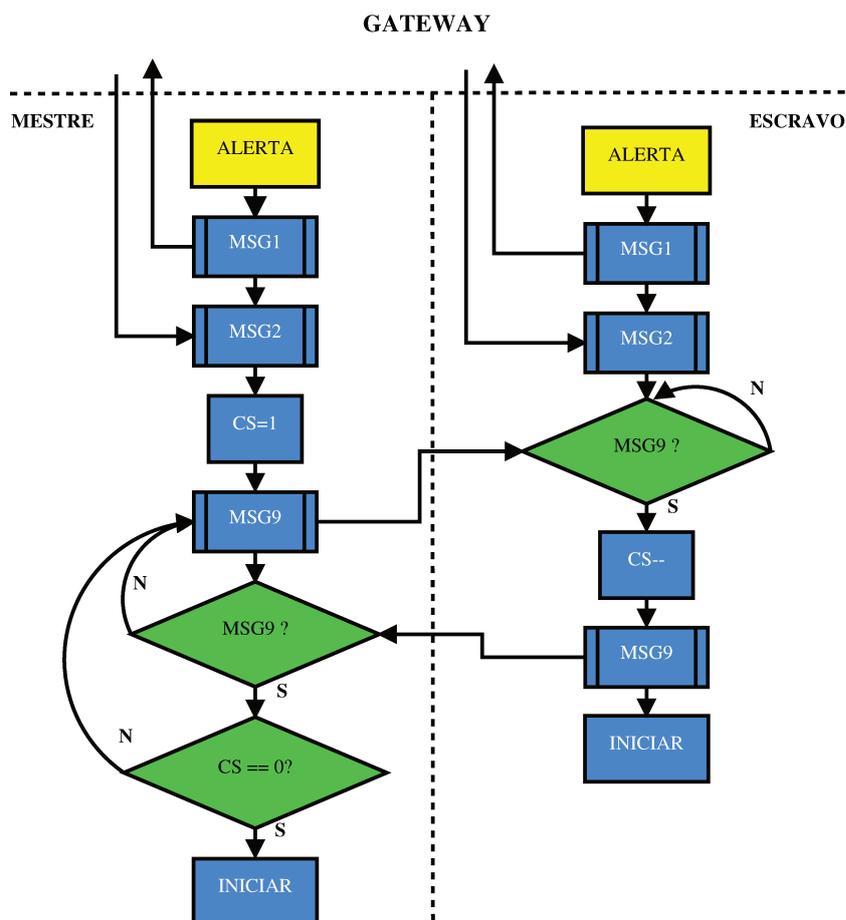


Figura 3.10 – Rotina de comunicação MEP de um cruzamento.

O fluxograma da Figura 3.10 exemplifica a inicialização dos semáforos de uma travessia SIMPLES-MD. Seu funcionamento dá-se da seguinte maneira:

- Após ambos semáforos serem conectados à rede elétrica, imediatamente entram na rotina de alerta;
- Em seguida, fazem uma requisição de configuração semafórica (*MSG1*) ao coordenador da rede;
- Após receber a configuração oriunda do coordenador (*MSG2*), armazenam tais valores em suas RAMs;
- No caso do semáforo ser mestre:

- Atribui valor 1 para um variável de contagem semafórica,  $CS = 1$ ;
  - Por meio da mensagem *MSG9*, envia a variável  $CS$  para o endereço do seu escravo;
  - Permanece em espera verificando a recepção de mensagens e de tempos em tempos reenvia a mensagem *MSG9*;
  - No momento em que o mestre recebe o retorno da mensagem *MSG9* contendo o valor de  $CS = 0$ , cessa o modo de alerta e entra no modo de operação normal, isto é, realiza a mudança dos estados de acordo com os tempos de verde, amarelo e vermelho fornecidos pelo coordenador.
- No caso do semáforo ser escravo:
    - Permanece à espera das mensagens *MSG9*, fornecidas pelo seu mestre;
    - Após receber a mensagem *MSG9*, decrementa a variável de contagem semafórica fornecida pelo *MSG9* e à reenvia para o seu mestre;
    - Suspende o modo alerta e inicia o modo de operação normal, isto é, realiza a mudança de seus estados mediante ao envio das próximas *MSG9* pelo mestre do cruzamento.

Dessa forma a mensagem *MSG9* sempre dará uma volta completa no cruzamento, sempre partindo do mestre, passando pelos escravos e retornando novamente ao mestre. Esse conceito expande-se para as interseções T-MU/MU 1 e T-MD/MU 1, que possuem um mestre e dois escravos. Assim, no caso de haver um acidente de trânsito que deixe qualquer um dos semáforos pertencentes ao cruzamento inoperante (seja por questões de queda de energia elétrica e/ou perda de pacotes de dados), os demais semáforos presentes no cruzamento entrarão em rotina de ALERTA (amarelo intermitente) e enviarão uma mensagem de falha semafórica ao *gateway* da rede, mensagem *MSG10*, notificando a eventual inoperância do referido semáforo.

### 3.3.1.2 Comunicação mestre escravo temporários

Semelhantemente à comunicação MEP, a comunicação Mestre Escravo Temporário (MET) também realiza uma volta completa no cruzamento. Porém nesse caso ocorrem mudanças no estado do escravo em períodos em que não há mudança do estado do mestre. Assim é necessário que haja uma mudança na regência do cruzamento, ou seja, o mestre se torna escravo e o seu escravo se torna mestre.

No modo MET realiza-se a transferência da regência do cruzamento a cada término de *loop* de cada semáforo, até completar o ciclo de todos os semáforos. Ao terminar, o *loop* é reiniciado no mestre original do cruzamento, a Figura 3.11 exemplifica tal situação.

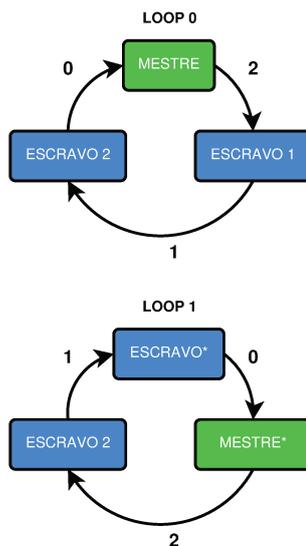


Figura 3.11 – Rotina de comunicação MET de um cruzamento.

A Figura 3.11 exibe o caso particular de uma interseção com três semáforos, com o decréscimo do contador de semáforos de 2 até 0, exatamente como o MEP funciona. Porém quando o mestre muda o estado de amarelo para vermelho, ao invés dele enviar  $CS=2$  para o seu escravo, ele envia 0 e automaticamente muda sua condição de mestre para escravo. Já o seu imediato escravo, ao receber a variável  $CS=0$ , este por sua vez muda sua condição de escravo para mestre.

### 3.3.1.3 Falha semafórica

Devido a comunicação entre os semáforos ser feita completamente sem fio, é necessário criar uma rotina de falha de comunicação semafórica. Sabendo-se que a cada mudança do estado do mestre é enviada uma mensagem *MSG9* para o seu escravo, criou-se uma rotina onde caso o semáforo mestre ou escravo não receba uma mensagem *MSG9* em um tempo menor ou igual ao tempo do estado atual acrescido de um segundo, dispara-se uma mensagem de falha semafórica *MSG10* para o coordenador da rede. Desse modo, qualquer semáforo que por alguma razão (acidente de trânsito, falta de energia elétrica e/ou perda de pacotes) parar de replicar as mensagens, todo o restante dos semáforos do cruzamento entrarão no modo de falha semafórica.

Estando no modo de falha semafórica tanto o semáforo mestre, quanto o escravo, retornam aos seus estados de inicialização, conforme descrito anteriormente na seção 3.3.1.1.

### 3.3.1.4 Atuação semafórica

Com o objetivo de realizar o bloqueio de um determinado cruzamento e/ou determinada avenida para situações extraordinárias, como *shows* e demais eventos públicos,

durante um determinado tempo (estipulado pela central de gestão, *gateway* do sistema) os semáforos permanecerão em um dos seguintes modos: siga (luz verde), pare (luz vermelha) ou alerta (amarelo intermitente).

As mensagens de atuação semafóricas são usadas para fazer com que um determinado semáforo permaneça em um estado e um tempo determinado pela central de gestão. Portanto ao receber uma mensagem *MSG3* como por exemplo vermelho/3600, o semáforo em questão retornará uma mensagem de *MSG4* ao *gateway* e independente de seu estado atual, imediatamente mudará para o estado vermelho e permanecendo nele por 3600 segundos. Durante seu tempo de atuação, não irá repassar as mensagens *MSG9* que completam a volta do cruzamento, forçando os semáforos restantes desse cruzamento a entrarem no modo *MSG10* (falha semafórica). Ao término do tempo de atuação, o semáforo entrará na rotina de inicialização, conforme descrita na Seção 3.3.1.1.

#### 3.3.1.5 Leitura semafórica

O monitoramento do estado de todos os semáforos conectados à rede semafórica pode ser feito em tempo real através do uso das mensagens *MSG5*. O *gateway* envia uma mensagem, por exemplo *MSG5*, a um semáforo da rede e o mesmo retorna uma mensagem *MSG6*, contendo as seguintes informações:

- O estado das lâmpadas dos grupos focais veicular e pedestre, conforme descrito na Seção 3.2;
- Seu estado atual, podendo ser verde, amarelo, vermelho ou estágio pedestre.

### 3.3.2 Progressão semafórica em tempo real

Além de possibilitar o controle e monitoramento de cada semáforo da rede, o sistema proposto também será capaz de realizar a progressão semafórica em tempo real, de modo a reduzir as rotinas de frenagem e aceleração dos veículos de vias arteriais de grandes centros urbanos e portanto propondo reduzir a emissão de gases poluentes à atmosfera.

Restritamente à aplicações envolvendo às questões dos sistemas de gestão semafórica, diversos métodos de gestão e melhorias tecnológicas estão sendo propostos ao redor do mundo. Os controles de tráfego em área de tempo estático e dinâmico (responsivo ao tráfego) são as técnicas de gestão semafórica mais utilizadas (HAMILTON et al., 2013). Sistemas de tempo estático não possuem a capacidade de adaptar o seu tempo de contagem com base nas condições de tráfego de tempo real. Já os sistemas de tempo dinâmicos são responsivos ao tráfego, capazes de operarem de acordo com a real demanda do tráfego. Para detectar as necessidades do tráfego, os sistemas semafóricos efetuam a leitura de variáveis como a quantidade de veículos que cruzam a interseção e sua velocidade,

possibilitando o desenvolvimento de algoritmos de prioridade e sincronismo (RANI et al., 2018; WEI et al., 2018). Sistemas como o *Split, Cycle and Offset Optimisation Technique* (SCOOT) e o *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System* (SCATS) são exemplos de sistemas responsivos ao tráfego, capaz de realizarem a otimização dos ciclos de operação e sincronismos em sistemas semafóricos (HUNT et al., 1982). Cidades como São Paulo e Fortaleza no Brasil já fazem o uso de tais sistemas (MORENO; MAMEDE; FILHO, 2014).

Devido aos grandes avanços tecnológicos em aplicações IoV, surge uma nova forma de comunicação chamada de *Vehicular Ad hoc NETWORKS* (VANETs) (WANG et al., 2019; RUTA et al., 2018; CHENG et al., 2015). Com um grande potencial de coleta de dados de trânsito, tais aplicações também possuem uma forte integração com sistemas de gestão semafóricos. A progressão semafórica em tempo real, conhecida como onda verde, é a realização do sincronismo de sucessivos cruzamentos de uma mesma avenida, de forma que o veículo que entrar na avenida e permanecer em um movimento retilíneo uniforme (MRU) irá atravessá-la sem parar (WEI et al., 2018; EL-SAYED; THANDAVARAYAN, 2018).

A análise de um sistema de controle de rede de tráfego urbano possui diferentes abordagens. Os pesquisadores de (HUANG; WENG; ZHOU, 2014) propuseram um sistema de controle semafórico baseado em redes de Petri (PN) sincronizadas. Eles descrevem que PN são uma boa forma de desenvolver sistemas de eventos discretos, com a capacidade de modelar aplicações como sistemas ferroviários e de controle de tráfego urbano. No trabalho (QI; ZHOU; LUAN, 2016) os autores também utilizaram as PN para controlar sistemas semafóricos, entretanto eles buscaram implementar estratégias para lidar com situações de emergência em cruzamentos, como em casos de acidentes urbanos. Nesse caso, os autores desenvolveram um sistema que não só controlam os semáforos (por meio de modelos de PN), mas também controlam os sistemas de detecção de fluxo veicular e de luzes de alerta.

Baseados em aplicações IoV, os pesquisadores de (CHEN; CHANG, 2017) modelaram o caso da progressão semafórica em tempo real, onda verde, por meio do controle de tráfego cooperativo, realizando comunicações *vehicle-to-vehicle* (V2V) e *vehicle-to-roadside* (V2R). Diversas métricas como *passing rate estimation*, *green duration determination*, *cooperative throughput maximization* e *green wave coordination* foram usadas para ajustar a fase e a duração do sinal de verde de interseções adjacentes (CHEN; CHANG, 2017). Para validar sua proposta, os autores realizaram diversas simulações baseadas no software SUMO (CHEN; SHARMA; TSENG, 2013), além do desenvolvimento de um protótipo para unidades de controle semafórico e para unidades veiculares. Por fim, os autores concluem que seu método, adotando a coordenação da onda verde, induz não só que os veículos continuem em movimento, mas também uma redução na emissão de gases poluentes à atmosfera.

ZHENG; XU propuseram um modelo de controle de onda verde e onda vermelha

(sincronismo de sucessivos cruzamentos de uma mesma avenida, de forma que o veículo que entrar na avenida irá parar em todas as demais interseções) em simultâneo e para diferentes direções (ZHENG; XU, 2011). O objetivo dos autores nesse trabalho é demonstrar a utilização de ambas ferramentas de gestão de tráfego, onda verde e onda vermelha, na prevenção de congestionamentos. Nesse caso, a coordenação da onda verde é utilizada para maximizar o escoamento dos veículos para fora da via arterial do centro urbano. Com o propósito oposto, a onda vermelha é utilizada para reduzir a entrada de veículos na via arterial da cidade. Desse modo, reduzindo a entrada e maximizando a saída de veículos da via, reduz-se situações de engarrafamento no centro urbano.

A fim de propor uma solução ótima de redução do tempo médio de espera dos veículos em uma avenida principal, (YINFEI, 2009) desenvolveu uma análise matemática baseada em uma equação que representa o grau de assincronismo entre interseções. Caso o grau de assincronismo entre interseções seja zero, os veículos não necessitarão parar, caso contrário eles irão parar, incrementando o tempo de espera. Semelhantemente a equação do grau de assincronismo entre interseções descrita por (YINFEI, 2009), (BOUDERBA; MOUSSA, 2018) modelaram o ajuste de fase de uma onda verde afim de verificar seu desempenho em comunicações V2V. Nesse caso, os autores realizaram a comparação entre a estratégia de onda verde e a estratégia de semáforos sincronizados (que chaveiam suas luzes de vermelho para verde e verde para vermelho simultaneamente) e em quase todos os casos a estratégia de onda verde se sobre-sai (BOUDERBA; MOUSSA, 2018).

Um estudo de caso realizado na cidade de Fortaleza, no Brasil, comparou o desempenho de um sistema de controle em tempo real sem progressão semafórica e outro com progressão semafórica nos intervalos de média e alta demanda de tráfego, por meio da análise de variáveis como tempo de percurso, atraso veicular e número de paradas veiculares (ALMEIDA; MENESES, 2007). O Controle de Tráfego em Área de Fortaleza (CTAFOR) possui o sistema de controle semafórico SCOOT. Eles concluem que a implantação de um sistema de onda verde é eficaz somente no período de média demanda de tráfego e não traz melhorias operacionais significativas nos períodos de alta demanda de tráfego, devido ao alto número de corredores arteriais que interceptam a avenida que possui onda verde.

Portanto, após observar diversos trabalhos de pesquisa semelhantes, tanto do ponto de vista científico, como o impacto econômico e ambiental, quanto do ponto de vista técnico, como os modelos matemáticos e sistemas utilizados, as seções seguintes abordarão as contribuições científicas e tecnológicas do presente trabalho.

### 3.3.3 Modelo matemático de coordenação da onda verde

O modelo matemático para realizar o sincronismo entre sucessivas interseções foi baseado nos trabalhos (YINFEI, 2009; BOUDERBA; MOUSSA, 2018). Para realizar a criação de uma equação que represente o instante exato em que cada semáforo deve

operar, considerou-se uma avenida como a mostrada na Figura 3.12.

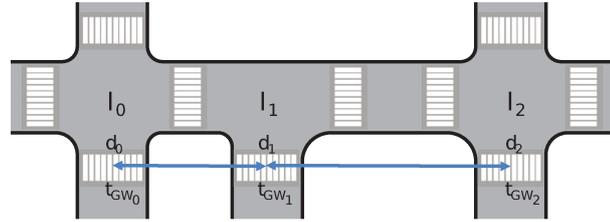


Figura 3.12 – Representação de uma avenida com sucessivas interseções semafóricas.

A Figura 3.12 apresenta 3 interseções semafóricas,  $I_0$ ,  $I_1$  e  $I_2$  com  $d_0$ ,  $d_1$  e  $d_2$  metros de distância da origem da avenida. Se considerarmos  $I_0$  como sendo a primeira interseção da avenida à ser sincronizada, e que todos os veículos que trafegam pela avenida viajam à uma velocidade constante, quando o semáforo da interseção  $I_0$  mudar para a luz verde, o tempo necessário para que os veículos alcancem as próximas interseções com os semáforos abertos (luz verde) será:

$$t_{GW(N)} = \begin{cases} 0 & N = 0 \\ \frac{d_{(N)} - d_{(N-1)}}{v} & N > 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

sendo  $t_{GW}$  o tempo de onda verde/sincronismo entre interseções da avenida à ser sincronizada,  $N$  o número da interseção atual e  $v$  representa a velocidade dos veículos da via, considerada constante nesta análise.

Sabendo-se que a cada período de tempo o semáforo repete o seu ciclo de operação  $T$  (somatória do tempo das luzes verde, amarela e vermelha) é possível relacionar matematicamente  $T$  com  $t_{GW(N)}$ , cujo resultado expressa o momento exato em que um semáforo da interseção  $N$  deve iniciar sua operação para que ele permaneça sincronizado com os demais, realizando a progressão semafórica dos veículos da avenida. A equação que realiza esse cálculo dá-se da seguinte maneira:

$$T_{S(N)} = MOD \left( \sum_{i=0}^N t_{GW(i)}, T \right), \quad (3.2)$$

sendo  $T_{S(N)}$  o tempo de início da operação do semáforo da interseção  $N$  e  $MOD(a, b)$  a função módulo, resto da divisão do parâmetro  $a$  pelo parâmetro  $b$ . A Figura 3.13 representa o efeito esperado de  $T_S$  sob o funcionamento de sucessivos semáforos de uma avenida.

A Figura 3.13 demonstra o sincronismo entre três interseções,  $I_0 \cdots I_2$ , cada uma com um grupo focal veicular (conjunto de luzes verde, amarela e vermelha para os veículos),  $GFV1 \cdots GFV3$ . Desse modo, se o  $GFV2$  iniciar sua operação  $T_{S_1}$  segundos após o início de  $GFV1$ , os veículos que cruzaram a interseção  $I_0$  serão capazes de encontrar o  $GFV2$  aberto (luz verde). O mesmo se aplica à  $GFV3$  e os demais semáforos que

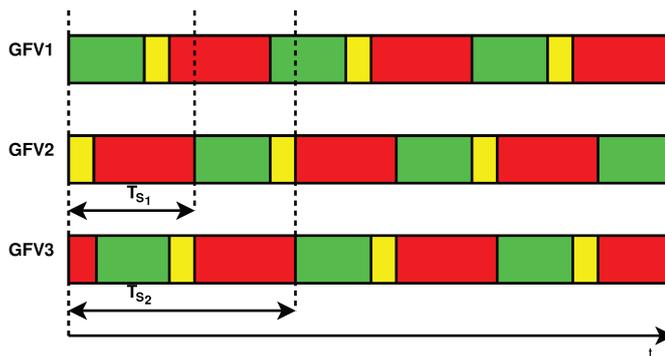


Figura 3.13 – Sincronismo entre as interseções.

houverem na avenida. Assim, para a implementação da onda verde no sistema semafórico, as mensagens da Figura 3.8 podem ser inseridas na rotina de inicialização dos semáforos, conforme a Figura 3.14.

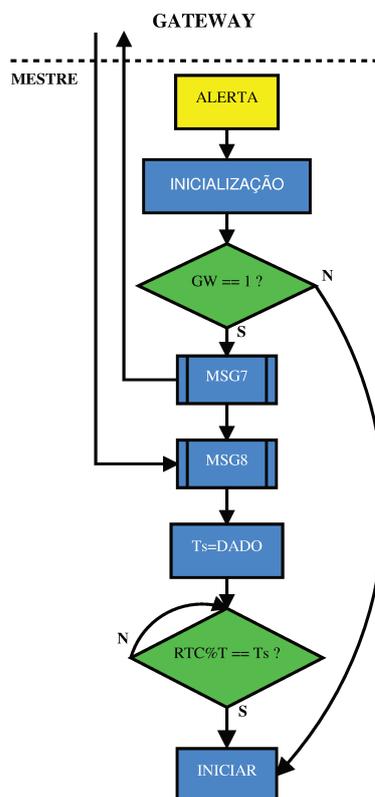


Figura 3.14 – Rotina de inicialização da onda verde.

A rotina de inicialização opera da seguinte forma:

- Após o semáforo ser devidamente instalado em uma interseção e ser conectado à rede elétrica, o mesmo entra no estado de *ALERTA* (amarelo intermitente), sinalizando que o semáforo não está em operação.
- Realiza uma rotina de inicialização (*INICIALIZAÇÃO*), requisitando mensagens de configuração para o gateway da rede.

- Caso o semáforo atual esteja inserido na progressão semafórica em tempo real, a *flag*  $GW = 1$ :
  - O semáforo faz uma requisição de configuração de onda verde (*MSG7*) ao coordenador da rede;
  - O coordenador da rede envia a mensagem *MSG8* para o semáforo que fez a requisição de configuração, fornecendo um *DADO* com o  $T_S$  apropriado para a interseção em que o semáforo se encontra, calculado por meio da Equação 3.2;
  - O semáforo recebe o *DADO* e armazena em uma variável da memória do microcontrolador.
  - Por meio do serviço de interrupção do RTC interno do microcontrolador, habilitado na *INICIALIZAÇÃO*, é realizada a comparação entre a função módulo do horário do relógio do sistema (fornecido pela rede) medido em segundos desde às 00:00 h e o período de operação  $T$  do semáforo, com o  $T_S$ . Caso ambos sejam iguais, o semáforo inicializa sua operação, caso contrário permanece aguardando o momento de ser inicializado.
- Caso a *flag*  $GW = 0$ :
  - O semáforo inicializa imediatamente sua operação.

Desse modo, todos os semáforos inseridos na progressão semafórica iniciarão sua operação nos instantes de tempo previstos pela Equação 3.2, além deles não necessitarem de ser energizados em conjunto, ou seja, a instalação dos semáforos na avenida pode ser feita de forma aleatória. O protocolo prevê também possíveis atualizações tanto nos valores de  $T$  quanto no de  $T_S$ , por meio do uso das mensagens *MSG11* e *MSG12*.

No caso de uma alteração na velocidade média de locomoção na avenida, os valores de  $t_{GW}$  na Equação 3.1 mudarão e conseqüentemente haverá novos valores de  $T_S$ , Equação 3.2. Para realizar a atualização, o coordenador da rede XMesh enviará uma mensagem *MSG11* com o novo valor de  $T_S$  individualmente para cada semáforo da avenida. Porém como cada interseção da avenida pode ser de um determinado tipo, os semáforos da interseção só serão atualizados quando o semáforo mestre estiver no início de seu ciclo de operação. A Figura 3.15 mostra o diagrama temporal, representação visual dos tempos de duração de cada estado do semáforo (luzes verde, amarela e vermelha), de funcionamento de uma interseção SIMPLES-MU.

Por haver apenas um semáforo na interseção da Figura 3.15, com *GFV1* e *GFP1*, o semáforo 1 é denominado o mestre do cruzamento. Porém no caso de uma interseção que possui vários semáforos, o semáforo localizado na avenida em que será implementada a onda verde será denominado de mestre do cruzamento e o restante dos

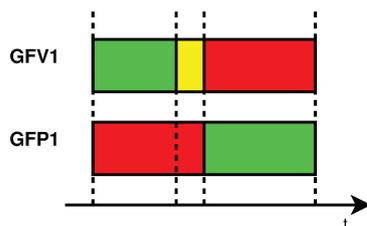


Figura 3.15 – Diagrama temporal teórico para uma interseção SIMPLES-MU.

semáforos da interseção serão os escravos do cruzamento. As Figuras 2.6c e 3.16 mostram o diagrama de estágios e temporal de funcionamento de uma interseção em CRUZ-MD/MD, contendo quatro semáforos com GFV e GFP.

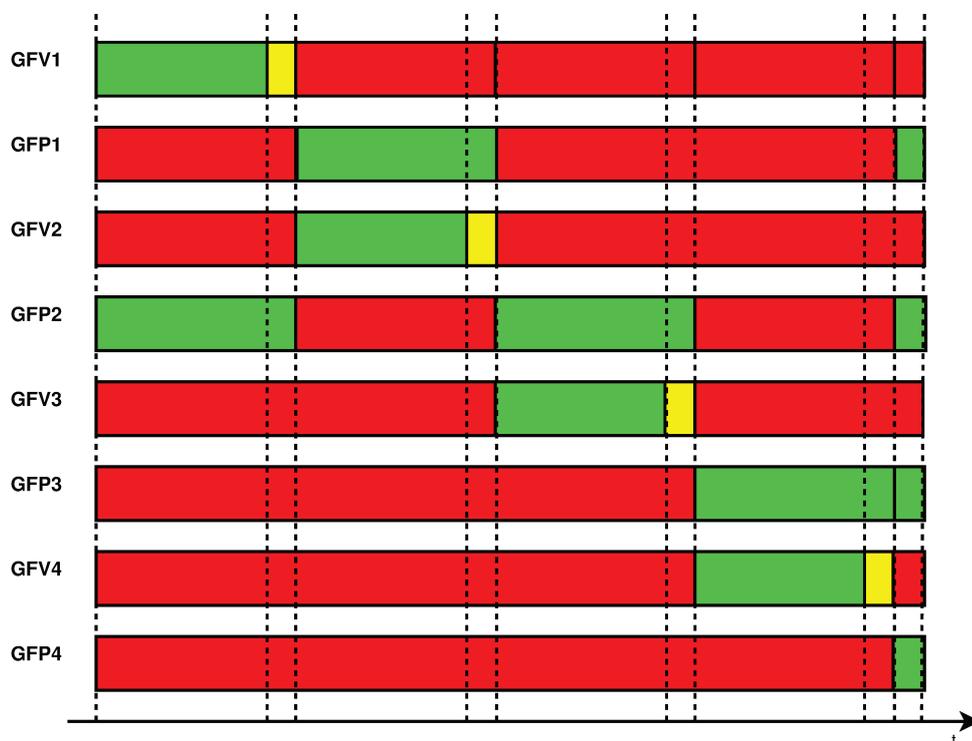


Figura 3.16 – Diagrama temporal teórico para uma interseção em CRUZ-MD/MD.

Conforme o diagrama temporal teórico para uma interseção em CRUZ-MD/MD visto na Figura 3.16, que possui quatro semáforos, apenas o semáforo 1 (semáforo que controla os movimentos veiculares pela avenida que possui onda verde) que possuirá o seu respectivo  $T_S$ . Porém, como os demais semáforos da interseção (semáforos 2, 3 e 4) estão em sincronia com o semáforo 1, o efeito de  $T_S$  será passado para todos os semáforos, isto é, todos os semáforos do cruzamento terão um deslocamento em seus respectivos diagramas temporais de exatos  $T_S$  segundos.

### 3.4 Rede XMesh e módulo RF

Quando se trata de realizar a comunicação sem fio entre dispositivos eletrônicos surgem diversas tecnologias que operam sob determinadas circunstâncias. Porém quando a aplicação exige requisitos como uma grande quantidade de dispositivos se comunicando na mesma rede, à determinadas distâncias e taxas de transferências, o horizonte de escolhas se restringe a algumas soluções (CUNHA, 2016; CUNHA et al., 2016; CUNHA et al., 2016; CUNHA; CARDEIRA; MELICIO, 2016; SILVA, 2018; SUNDAR; HEBBAR; GOLLA, 2015). Diversos trabalhos utilizam o protocolo de comunicação ZigBee, capaz de operar nas circunstâncias citadas anteriormente, criando uma rede com topologia *mesh*. Redes *mesh* são ideais para aplicações em cidades inteligentes, devido sua capacidade de regenerar-se caso algum dispositivo se desligue da rede, refazendo a rota de comunicação por outro dispositivo em seu raio de alcance. A Tabela 3.7 exhibe alguns dos principais protocolos de comunicação utilizados em RSSF. Porém, embora já existam diversas aplicações tecnológicas utilizando tais protocolos, ainda existem melhorias significativas a serem exploradas, como: algoritmos de tabelas de roteamento, redução de gasto médio de energia, redução de latência entre nós de rede, aumento de banda, aumento de área de cobertura, aumento de nós na rede (STOJMENOVIC, 2005).

Tabela 3.7 – Principais protocolos de comunicação utilizados em RSSF.

<b>Protocolos de comunicação</b>
6LoWPAN, 802.15.4, Bluetooth, MiWi, Near field communication, OCARI, ONE-NET, OSIAN, Thread, TIBUMAC, WirelessHART, ZigBee, Z-Wave

O presente trabalho utiliza-se de tecnologias recentes que estão em fase de conclusão de desenvolvimento, porém se encontram operacionais para uso, provenientes de uma pesquisa de doutorado na Unicamp (LUZ; MANERA; DONATTI, 2017; LUZ; MANERA; DONATTI, 2019a; LUZ; MANERA; DONATTI, 2019b). Mais especificamente como pode ser visualizado na Figura 3.17, a rede XMesh possui dois blocos inovadores para atender as necessidades requeridas para cidades inteligentes.

Citando os blocos da Figura 3.17 de forma sucinta, pois estes não são o escopo deste trabalho:

- Bloco N4IoT – camada de rede com modelamento matemático para rotas;
- Bloco M4IoT - protocolo que permite criação de uma *Virtual Private Device Network* (VPDN) e utiliza curvas elípticas como forma de criptografia, possuindo um baixíssimo *payload* por pacote em comparação a outros padrões de pacotes para redes *mesh*.

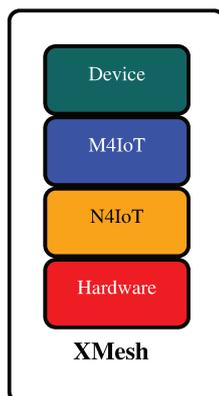


Figura 3.17 – Modelo da rede XMesh.

A rede XMesh também opera na banda de frequência não-licenciada de 2,4 GHz, podendo atingir uma taxa de transferência de até 2 Mbps, com uma distância máxima de comunicação de 100 à 1800 m e potência máxima de saída de 20 dBm. Otimizado para melhorar o parâmetro de latência, o quadro de dados é formado por 30 bytes, sendo 20 bytes de *header* e 10 *bytes* para dados do usuário.

Para o andamento deste trabalho foi conveniente utilizar a rede XMesh, com o seu respectivo módulo de RF, pois os protocolos de comunicação para RSSF, vistos na Tabela 3.7, embora definam diversas técnicas de entrega de pacote, não implementam uma tabela de roteamento completa, apenas parcial/limitada (MOEINI; YEN; BASTANI, 2017; CHAKRABORTY et al., 2006; RATSIMOR et al., 2002), pois quanto maior for o número de dispositivos em tais redes (Tabela 3.7) maior deverá ser sua capacidade de armazenamento de dados (MOEINI; YEN; BASTANI, 2017). A rede XMesh desenvolve suas rotas por meio de um modelamento matemático, possibilitando seu uso em dispositivos com pouca memória disponível e baixo poder de processamento, como em sistemas microcontrolados e embarcados usados em aplicações IoT. Isso permite o atendimento à inúmeros pontos de rede. Além disso, a rede XMesh possibilita uma VPDN individual por dispositivo. Com isso, reservou-se a VPDN de número 2 para os dispositivos semafóricos, pois a VPDN 1 já está alocada para os dispositivos de iluminação pública.

### 3.5 Atualização do sistema

Um fator importante que deve ser levado em consideração no momento do desenvolvimento de aplicações de IoT e principalmente para cidades inteligentes é atualização de possíveis correções no *firmware* do sistema. Se, no momento do desenvolvimento do *firmware* de uma determinada aplicação em cidades inteligentes não for considerado um algoritmo de atualização do sistema, quando o dispositivo ir à campo, qualquer comportamento não previsto e/ou erro de projeto do *firmware* acarretará em:

- Deslocamento de uma equipe técnica até o local de instalação;
- Remoção do dispositivo, deixando-o inoperável;
- Por meio de um aparelho gravador de microcontroladores, realizar a atualização do *firmware in loco* ou em um laboratório apropriado;
- Reinstalação do dispositivo.

Em aplicações que possuem milhares de dispositivos espalhados pela cidade, todos os procedimentos descritos anteriormente devem ser feitos para cada um dos dispositivos da cidade, tornando-se uma atividade tanto morosa, quanto dispendiosa. Para evitar tais situações os dispositivos devem possuir alguma forma de se comunicar com a central de gestão, e no caso de dispositivos IoT essa comunicação normalmente é realizada por intermédio de uma rede sem fio. Tal método, conhecido como *Firmware Update Over The Air* (FUOTA), consiste na criação de uma porção de código localizada no início da memória *flash* do sistema microcontrolado, capaz de sobrescrever a região do *firmware* atual de acordo com comandos de requisição de atualização fornecidos pela rede.

Em um sistema semafórico é importante que mesmo durante o processo de atualização do *firmware* do sistema, o semáforo permaneça em plena operação e só após a completa atualização do *firmware* que o mesmo deve reinicializado com o novo *firmware*. O código de um FUOTA também deve ser robusto o suficiente para impedir a execução de um novo *firmware* cujo processo de atualização foi mau sucedido, tanto por questões de falhas elétricas (desligamento acidental de um semáforo), quanto por perdas de pacotes de dados (relacionados à causas como as descritas na Seção 2.4). Para que isso seja feito, a região de memória *flash* deve ser dividida em três regiões: região do código de FUOTA, região do *firmware* principal e em uma região de atualização de *firmware*. Desse modo, toda vez que o microcontrolador for inicializado, o código contido na região FUOTA realiza a comparação entre os *firmwares* das regiões principal e de atualização. Para o caso em que ambas regiões (principal e de atualização) são iguais, após a inicialização o programa salta da região de FUOTA para a principal. Porém para o caso das regiões (principal e de atualização) serem diferentes, o código FUOTA, verifica se a somatória de todo o conteúdo contido na região de atualização é igual ao valor enviado pela rede (valor correto do resultado da somatória do *firmware* de atualização) e se forem iguais realiza a transferência do novo *firmware* para a região principal, e se forem diferentes executa o *firmware* atual, sem a atualização.

Já projetados para realizarem o processo de atualização pela rede, tanto o protocolo M4IoT quanto o *firmware* do sistema semafórico desenvolvido possuem comandos e funções de tratamento dos dados trocados entre os semáforos e a rede.

## 3.6 Segurança do sistema

Além de garantir a fluidez dos veículos rodoviários, por se tratar de um sistema de controle complexo, um semáforo deve sobretudo assegurar que todos os movimentos veiculares permitidos em um determinado cruzamento não sejam convergentes (movimentos com origem em diferentes aproximações mas com o mesmo destino) e nem movimentos conflitantes (movimentos com origens diferentes cujas trajetórias se interceptam em algum momento na interseção) (CONTRAN, 2014).

Tendo em vista que o desenvolvimento de um semáforo cuja comunicação é totalmente realizada via rede sem fio, o sistema não só deve operar de forma sincronizada, mas também deve garantir robustez quanto às possíveis perdas de dados (sinal de RF), falhas semaforicas e invasões da RSSF. Embora não seja abordado nesta dissertação, conforme proposto por (CUNHA, 2016) uma forma de garantir que não haja a perda de informações importantes do sistema é inserir uma rede de comunicação redundante, de modo que, caso o sinal de uma rede seja perdido, uma outra tecnologia de rede (com ou sem fio) poderia garantir a retransmissão dos dados. As subseções seguintes abordarão todas técnicas implementadas para garantir que o sistema semaforico opere de forma segura.

### 3.6.1 Segurança em nível de *hardware*

A primeira observação a ser feita diz respeito ao funcionamento dos grupos focais do semáforo. Conforme descrito anteriormente na Seção 3.2, o sistema semaforico possui não só a capacidade de controlar seus grupos focais, mas também de realizar a detecção de lâmpadas queimadas. Portanto, se qualquer lâmpada do semáforo queimar, a central de gestão (dispositivo *gateway*) é acionada imediatamente. Se, no entanto, o circuito sensor AC/DC for comprometido como um todo, isto é, caso o circuito inteiro seja danificado por descargas elétricas acidentais, o microcontrolador é capaz de detectar a inoperância do circuito, isso porque o microcontrolador utilizado possui não só a capacidade de acionar um pino de saída, mas também de verificar o estado lógico desse pino. Logo, se o circuito sensor AC/DC e até o pino de acionamento forem danificados, ao setar o pino de saída para o nível lógico 1 e efetuar a leitura do estado do pino de saída (através de uma função disponível no *firmware*) e ela for nível lógico 0, indicará o mau funcionamento do circuito.

### 3.6.2 Segurança em nível de *firmware*

Outra forma de se preservar a segurança em uma interseção com semáforos sem fio é realizada por meio de rotinas pré-estabelecidas no *firmware* do sistema, vide a Subseção 3.3.1.3.

### 3.6.3 Segurança em nível de rede

O último cenário a ser considerado e que diz respeito a segurança do sistema é a possibilidade do sistema semafórico ser alvo de um ataque cibernético. Segundo (LEE; KIM; SEO, 2019), desde que haja sensores de detecção de fluxo veicular cuja a transmissão dos dados é feita via RSSF, o sistema semafórico torna-se vulnerável em termos de segurança. Nesse caso, se um *hacker* com más intenções, munido de ferramentas tecnológicas apropriadas, for capaz de se conectar ao detector de fluxo veicular via RSSF, o mesmo pode às retransmitir com os dados manipulados, ocasionando confusão no sistema semafórico e possíveis acidentes de trânsito.

Para evitar que eventuais ataques cibernéticos assumam o controle total do sistema, o mesmo deve possuir formas de encriptação de dados, para que apenas o dispositivo correto, aquele que possuir a chave de acesso, possa receber a informação. Nesse quesito, conforme mostrado na Figura 3.18, a rede XMesh possui três camadas de encriptação: *hardware*, *software* e de protocolo.

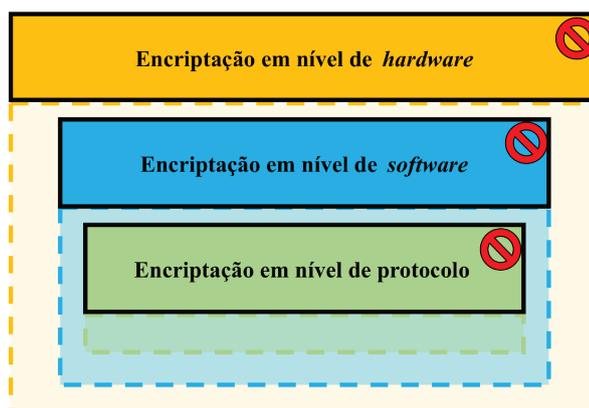


Figura 3.18 – Diagrama dos tipos de encriptação implementados pela rede XMesh.

#### 3.6.3.1 Encriptação em nível de *hardware*

O protocolo M4IoT implementa criptografia do tipo Padrão de Encriptação Avançado (*Advanced Encryption Standard - AES*) de 256 bits em nível de hardware. Conforme (SCRIPCARIU et al., 2018), o AES é um algoritmo de encriptação amplamente utilizado sendo considerado um algoritmo seguro e robusto com recomendações para instituições governamentais e até aplicações militares. Scripcariu *et al.* demonstraram que sequências de dados constantes de 16 caracteres idênticos produzem algumas respostas da chave de criptografia que permite a recuperação da chave por número reduzido de tentativas, evidenciando uma possível vulnerabilidade (SCRIPCARIU et al., 2018).

### 3.6.3.2 Encriptação em nível de *software*

Outro recurso de criptografia utilizado pelo protocolo M4IoT é o algoritmo de curva elípticas (*Elliptic Curve Cryptography* - ECC) de 24 bits em nível de *software*. A ECC trata-se de uma criptografia de chave pública de modo que a mensagem é criptografada usando a chave privada do emissor e o processo de descryptografia é feito usando a chave pública dos emissores e a chave privada do receptor. A principal vantagem da ECC é que ela fornece melhor segurança com tamanho de chave menor (KEERTHI; SURENDIRAN, 2017).

### 3.6.3.3 Encriptação em nível de protocolo

Por fim, caso o agente invasor seja capaz de descryptografar os algoritmos citados anteriormente, ainda ele terá que encontrar a mensagem do protocolo correta para poder atuar sobre o sistema semaforico. Felizmente os comandos de atuação fornecidos pelo protocolo M4IoT não são os mesmos para sucessivos envios, isto é, o agente invasor não encontrará um padrão dos dados enviados para replicá-los.

Além dos comandos de atuação não serem constantes, eles ainda são válidos para apenas um intervalo de tempo, de modo que qualquer tentativa de envio de comando após esse intervalo de tempo, o sistema automaticamente invalidará a mensagem.

## Conclusão

O protótipo desenvolvido na Seção 3.2 reúne os circuitos necessários para realizar a atuação e leitura dos GFV e GFP, bem como a comunicação com a rede XMesh. Foram produzidas oito placas de circuito impresso, idênticas a da Figura 3.6, a fim de ao final do projeto realizar a demonstração do potencial do trabalho proposto.

Com a programação de toda a lógica descrita anteriormente em forma de fluxogramas, o circuito desenvolvido na Seção 3.2 será capaz de operar nas condições pré-estabelecidas no capítulo anterior, Capítulo 2. Logo, o Capítulo 3 descreveu todo o desenvolvimento do projeto proposto de modo que seus respectivos testes podem ser iniciados, sendo este o assunto do próximo capítulo.

## 4 Resultados

*Tendo em vista o desenvolvimento de um protótipo de um sistema semafórico sem fio, o presente capítulo busca apresentar o funcionamento do protótipo por meio de seus diagramas temporais, para todos os tipos de interseções estudadas no Capítulo 2 bem como para o caso da progressão semafórica em tempo real. Avalia-se também nesse capítulo o desempenho do sistema sob situações de falhas de diversas naturezas.*

### 4.1 Metodologia

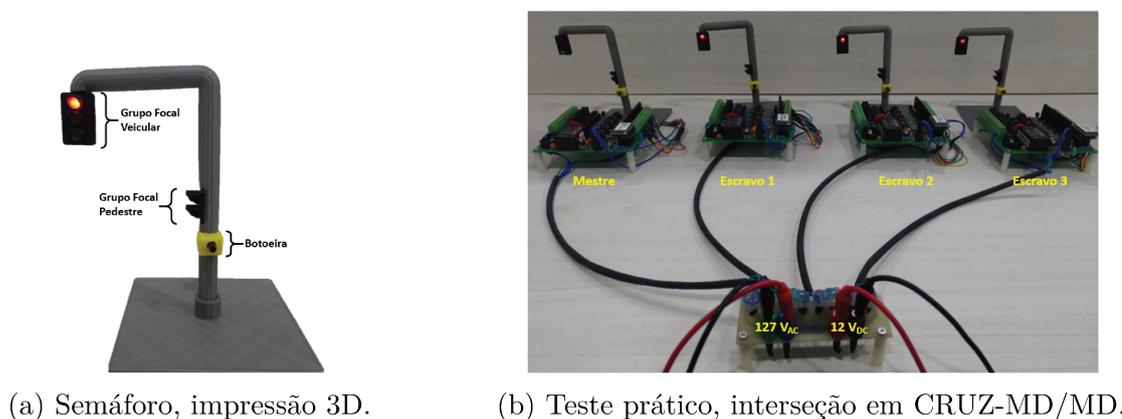
De formar a testar o correto funcionamento dos circuitos eletrônicos descritos na Seção 3.2, as trocas de dados entre os semáforos descritas na Seção 3.3 e a capacidade do sistema de lidar com falhas que comprometam a segurança dos veículos em interseções semafóricas descrito na Seção 3.6, através da medição dos sinais enviados para os GFV e GFP, avaliou-se as seguintes parâmetros:

- Períodos de operação: verificar o tempo de acionamento de cada lâmpada do GFV e do GFP, a execução do estágio exclusivo para pedestres e o correto comportamento dos semáforos de uma mesma interseção;
- Onda verde: analisar os tempos de inicialização para semáforos em onda verde e o sincronismo entre sucessivos cruzamentos;
- Falhas semafóricas: examinar o comportamento do sistema semafórico perante a falta de energia elétrica (tanto para o mestre, quanto para o escravo do cruzamento) e a falha na comunicação entre os semáforos, tanto da mesma interseção, quanto de sucessiva interseções semafóricas.

Para todas as situações descritas anteriormente, as medições foram feitas com o auxílio de um analisador lógico, equipamento eletrônico capaz de medir a mudança de níveis lógicos e exibí-los com precisão no *software* Saleae Logic para computadores. Porém como o analisador lógico utilizado possui apenas 8 canais digitais, mediu-se todos os sinais de um semáforo em 5 canais e mediu-se também, no sexto canal, o sinal de verde veicular do semáforo mestre do cruzamento.

Desse modo a medição dos dados de todos semáforos de um cruzamento foram sincronizados com o seu mestre original. O sincronismo de todos os semáforos foi feito com a exportação dos dados do *software* do analisador lógico utilizado para o *software* de cálculos matemáticos MatLab<sup>®</sup>.

Complementarmente, com o objetivo de verificar visualmente o funcionamento de diversos semáforos operando em simultâneo, por meio do *software* de desenhos 3D assistidos por computador, Solidworks, modelou-se um semáforo em miniatura, contendo um GFV, um GFP e uma botoeira. Após finalizar a modelagem do semáforo no SolidWorks, através de uma impressora 3D, foram impressas quatro unidades semelhantes à exibida na Figura 4.1a, cuja as conexões com as PCIs podem ser vistas na Figura 4.1b.



(a) Semáforo, impressão 3D.

(b) Teste prático, interseção em CRUZ-MD/MD.

Figura 4.1 – Metodologia dos testes.

## 4.2 Teste de detecção de lâmpadas queimadas

Após realizar a montagem dos circuitos descritos na Seção 3.2, realizou-se o teste de detecção de lâmpadas queimadas, tanto para o circuito sensor de corrente DC quanto AC. O teste com as lâmpadas DC foi feito da seguinte forma:

- Conectou-se LEDs em todos os terminais DC dos GFV e GFP do protótipo;
- Colocou-se todos os terminais dos circuitos atuadores DC em nível lógico 1 e verificou-se os sinais amostrados pelos circuitos sensores de corrente DC. Todos os sinais amostrados foram visualizados pelo conteúdo das mensagens *MSG5* recebidas pelo *gateway* da rede. Para esse caso, os níveis lógicos foram 1 para todos os LEDs e que conforme a Tabela 3.2 todos os LEDs estavam acesos;
- Posteriormente colocou-se todos os terminais dos circuitos atuadores DC em nível lógico 0 e verificou-se novamente os sinais amostrados pelos circuitos sensores de corrente DC. Novamente, conforme a Tabela 3.2 e o teste visual prático, comprovou-se que os LEDs estavam apagados;
- Por fim, removeu-se os LEDs de todos os terminais DC dos GFV e GFP do protótipo e repetiu-se os procedimentos supracitados. Nesse caso, ao colocar os terminais dos circuitos atuadores DC em nível lógico 0, os níveis lógicos amostrados foram 0 para

todos os LEDs e que conforme a Tabela 3.3 e o teste visual prático, comprovou-se que os LEDs estavam desconectados ou queimados;

O mesmo procedimento foi realizado para os circuitos atuadores e sensores AC com lâmpadas incandescentes de 60 W e os mesmos resultados foram obtidos, isto é, os circuitos projetados na Seção 3.2 obtiveram o comportamento descrito pelas Tabelas 3.4 e 3.5. Desse modo, os testes de detecção de lâmpadas permitiram validar os circuitos eletrônicos do controlador de semáforos, sendo portanto capazes de detectar o mal funcionamento de seus GFVs e GFPs.

### 4.3 Teste dos períodos de operação

Para verificar os períodos de operação corretos, considerou-se os tempos das lâmpadas verde, amarela e vermelha como sendo de 10 s, 2 s e 12 s, respectivamente. A primeira a ser testada foi a interseção SIMPLES-MU, por possuir apenas um semáforo foi considerada a interseção mais simples a ser analisada. A Figura 4.2 exibe o GFV1 composto pela sobreposição dos sinais das luzes verde, amarela e vermelha medidos pelos canais de 0 à 2 do analisador lógico e o GFP1, com o mesmo processo de leitura GFV1 porém para as luzes vermelha e verde, dos canais 3 e 4 do analisador lógico.

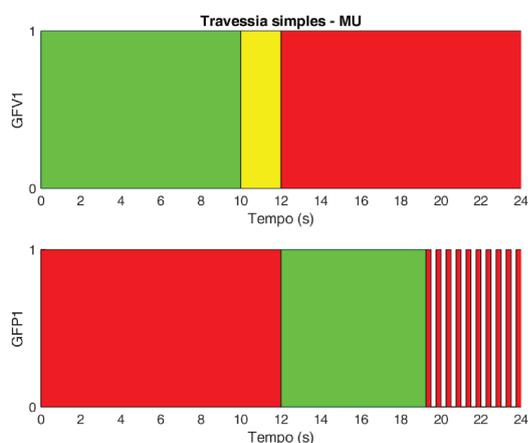


Figura 4.2 – Travessia SIMPLES-MU.

Após a análise da Figura 4.2, nota-se que a lâmpada verde permanece ligada durante o período de 0 à 10 s, a lâmpada amarela durante o período de 10 à 12 s e a lâmpada vermelha durante o período de 12 à 24 s, e o GFP1 permanece 12 s com a luz vermelha acesa e o restante do período composto por 60 % com a luz verde acesa e 40 % no modo vermelho intermitente, representando que o tempo de verde pedestre está terminando, situação prevista no manual brasileiro de sinalização de trânsito (CONTRAN, 2014). Todos intervalos funcionaram como o projetado para o modelo teórico da interseção semafórica SIMPLES-MU da Figura 3.15.

O outro teste realizado para verificar os períodos de operação dos semáforos foi feito em uma interseção semaforica em CRUZ-MD/MD, que por possuir quatro semáforos na mesma interseção comunicando-se uns com os outros por meio da comunicação MET foi considerada a interseção mais complexa à ser analisada. A Figura 4.3 exibe todos os sinais durante um ciclo de operação completo.

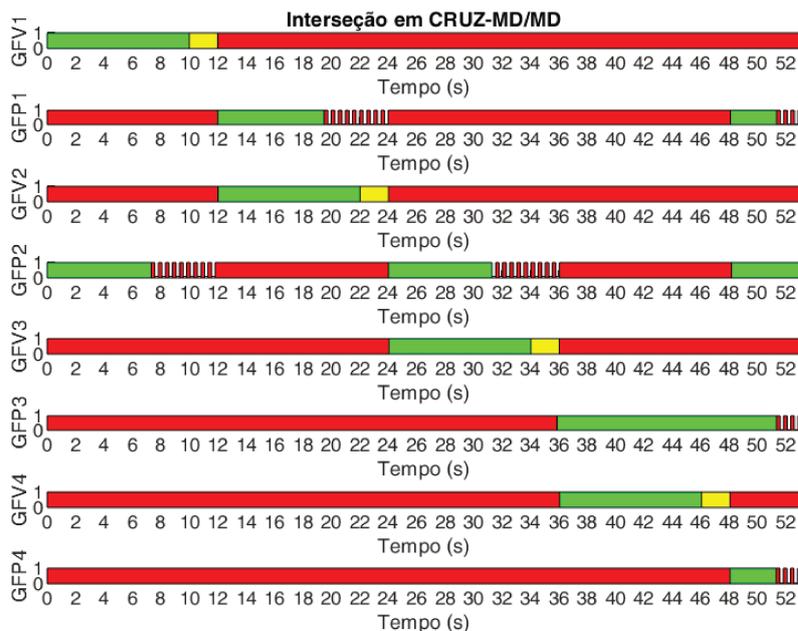


Figura 4.3 – Interseção em CRUZ-MD/MD.

Através da Figura 4.3 é possível observar várias condições de funcionamento dos semáforos. Para este teste considerou-se os tempos das lâmpadas verde, amarela e vermelha como sendo de 10 s, 2 s e 36 s, respectivamente, além do tempo de 5 s para a execução do estágio para pedestres. Nota-se primeiramente que a duração dos tempos dos GFV estão de acordo com os tempos previstos. Observa-se o funcionamento da comunicação MET entre os semáforos da interseção, tendo a troca do mestre do cruzamento a cada 12 s, isto é, o semáforo 1 torna-se o mestre da interseção à partir de 0 s, o semáforo 2 à partir de 12 s, o semáforo 3 no instante 24 s e o semáforo 4 em 36 s, totalizando o ciclo de operação completo de 48 s. Porém durante a execução deste teste, pressionou-se um das quatro botoeiras (presentes como um pino de entrada no protótipo da PCI vista na Figura 3.6) disponíveis da interseção em CRUZ-MD/MD, fazendo com que o ciclo de operação fosse acrescido de 5 s, comportamento visível em todos os GFP à partir de 48 s. Após finalizar o estágio de pedestres, os semáforos retornaram as estágio inicial repetindo os mesmos comportamentos permanentemente, conforme o seu diagrama temporal teórico, visto na Figura 3.16. Por questões de semelhança de abordagem, os testes dos períodos de operação dos demais tipos de interseções semaforicas abordadas no Capítulo 2 também foram efetuados e encontram-se no Apêndice A.

## 4.4 Teste da onda verde

Para realizar o teste do método de sincronismo proposto, foram construídas oito placas de circuito impresso (PCI) semelhantes a descrita na Seção 3.2, com propósito de testar a onda verde em duas avenidas distintas: a primeira com oito interseções SIMPLES-MU e a segunda com duas interseções em CRUZ-MD/MD. Para o primeiro teste, com interseções de  $I_0 \dots I_7$ , os valores de  $T_S$  foram calculados com base em uma velocidade constante de 50 km/h (valor escolhido arbitrariamente), conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 –  $T_S$  teórico para uma avenida com oito interseções SIMPLES-MU.

$I_N$	$T_{S(N)}$ (s)
$I_0$	0
$I_1$	15
$I_2$	10
$I_3$	4
$I_4$	11
$I_5$	14
$I_6$	21
$I_7$	6

A Figura 4.4 mostra os sinais de todos as oito interseções de uma avenida em onda verde que, por questões de simplicidade, exibe apenas os GFV de cada interseção.

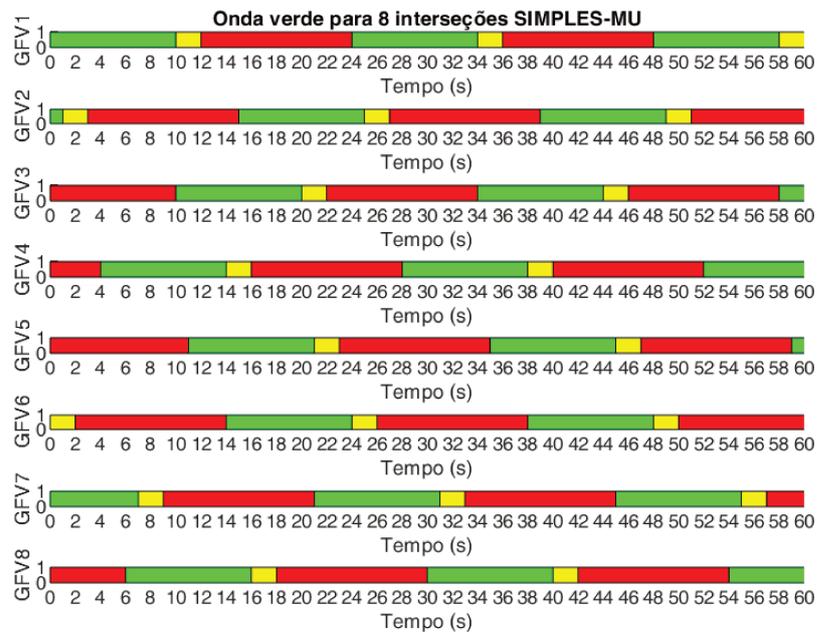


Figura 4.4 – Medidas de todos os semáforos de uma avenida em onda verde, com interseções SIMPLES-MU.

Ao realizar a comparação entre os valores da Tabela 4.1 e os sinais da Figura 4.4, nota-se que após as suas inicializações, os semáforos de cada interseção entraram em funcionamento nos exatos tempos de início de operação  $T_S$  estipulados para cada interseção.

Semelhantemente ao primeiro teste, realizou-se uma segunda análise da eficácia do método proposto, mantendo-se a mesma velocidade da avenida, porém trocando de oito interseções SIMPLES-MU para duas interseções em CRUZ-MD/MD. Para a nova análise tem-se apenas dois valores de  $T_S$ , conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 –  $T_S$  teórico para uma avenida com duas interseções em CRUZ-MD/MD.

$I_N$	$T_{S(N)}$ (s)
$I_0$	0
$I_1$	15

Os resultados da segunda análise podem ser vistos na Figura 4.5. Nesta ocasião, os semáforos mestres dos cruzamentos  $I_0$  e  $I_1$  são, respectivamente, os semáforos 1 (GFV1) e 5 (GFV5).

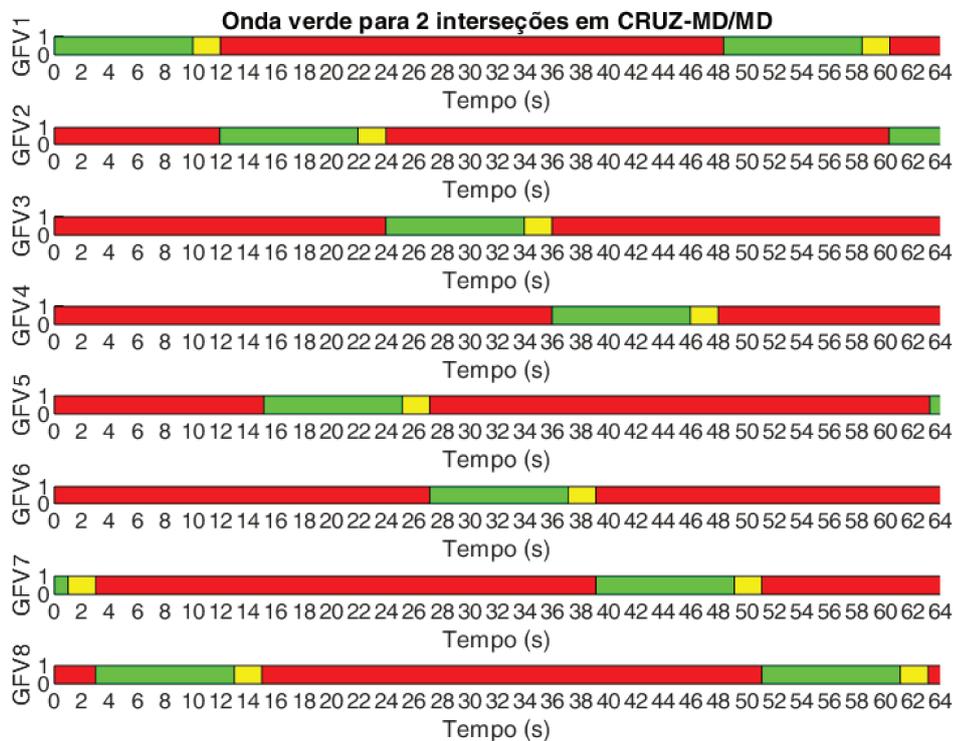


Figura 4.5 – Medidas de todos os semáforos de uma avenida em onda verde, com interseções em CRUZ-MD/MD.

Através dos dados da Tabela 4.2 e dos sinais da Figura 4.5 é possível notar que

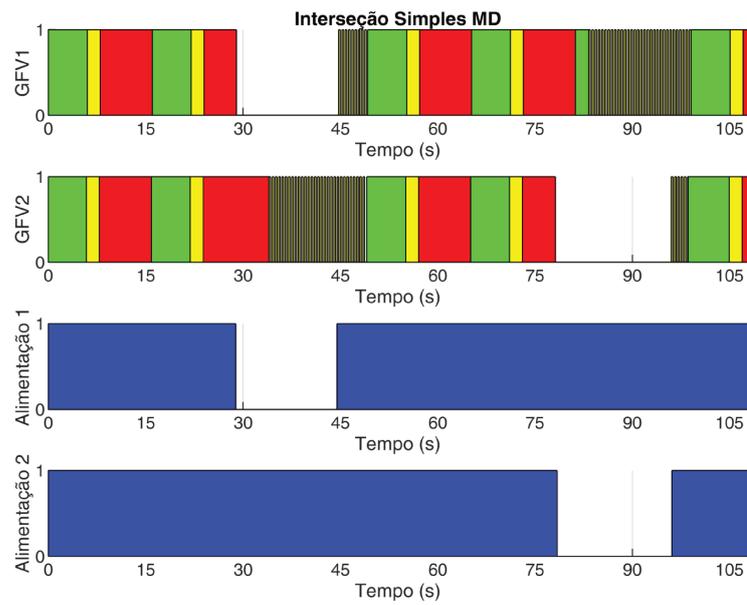
o semáforo mestre (GFV5) da interseção  $I_1$  possui uma defasagem de 15 s em relação ao mestre (GFV1) da interseção  $I_0$ . Desse modo, pelo GFV1 possuir um tempo de início de 0 s, os GFV2, GFV3 e GFV4 possuem exatamente os mesmos resultados do teste da Figura 4.3. Entretanto, pelo GFV5 possuir um tempo de início de 15 s os GFV6, GFV7 e GFV8 terão seus ciclos de operação igualmente deslocados em 15 s. Assim, finalizam-se os testes de onda verde.

## 4.5 Testes de falhas semafóricas

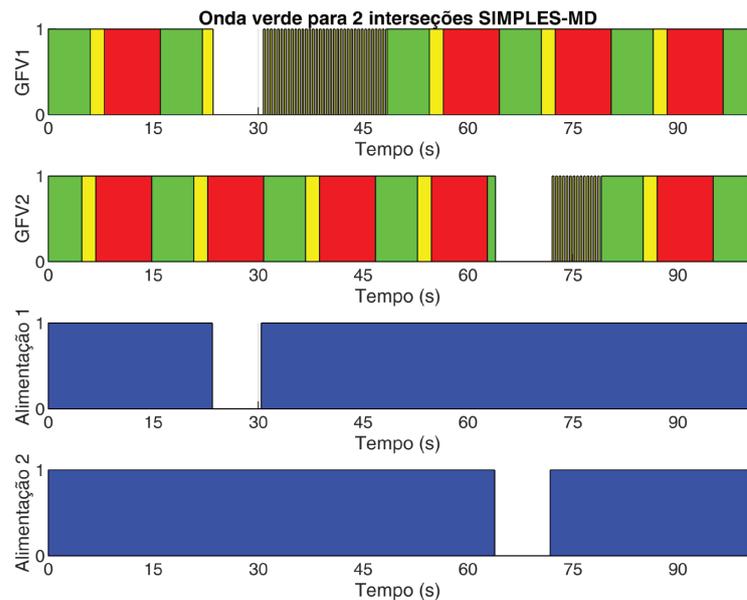
Os últimos testes à serem realizados analisam o comportamento esperado do sistema semafórico perante a falhas semafóricas. Considerou-se falhas devido à quedas de energia tanto no semáforo mestre, quanto em semáforos escravos e falhas devido à supressão da comunicação entre os semáforos. A Figura 4.6 exibe os diagramas temporais para uma interseção SIMPLES-MD sem onda e com onda verde, respectivamente, ambas no instante da ocorrência de falhas semafóricas por queda de energia elétrica.

Para poder realizar a medição de vários ciclos de operação e não comprimir demasiadamente a imagem resultante, modificou-se os tempos dos GFV para possuírem 6 s de luz verde, 2 s de luz amarela e 8 s de luz vermelha, totalizando um ciclo de operação de 16 s. Os sinais intitulados de “Alimentação 1” e “Alimentação 2”, vistos na Figura 4.6 representam as fontes de alimentação para ambos semáforos 1 e 2, respectivamente. De modo que, o valor “1” simboliza o fornecimento de energia elétrica de 127/220 V para o semáforo em questão e o valor “0” representa o corte de sua fonte de alimentação. Os valores “1” e “0” foram os níveis lógicos lidos pelo analisador lógico conectado no terminal de entrada de um módulo de acionamento de relés eletromecânicos. Logo, a mudança de 1 para 0 e vice-versa representa o instante exato do corte ou restabelecimento da energia elétrica dos semáforos.

Configurada como uma interseção SIMPLES-MD sem onda verde, a Figura 4.6a exibe o comportamento, em um primeiro momento, do escravo na ausência de seu mestre e num segundo momento, o oposto, isto é, o comportamento do mestre na ausência de seu escravo. Nota-se uma semelhança no comportamento de ambos, mestre e escravo, tanto na ausência de seu mestre/escravo, quanto no reestabelecimento do funcionamento normal de operação. Isso ocorre porque na ausência de seu mestre/escravo, não há troca da mensagem *MSG9* entre escravo/mestre em um tempo menor ou igual ao tempo do estado atual acrescido de um segundo, fazendo com que o semáforo *on-line* na rede (o que ainda possui energia elétrica) entre em estado de ALERTA com a luz amarela intermitente, situação observada no GFV2 por volta dos instantes de 30 e 50 s, e observada no GFV1 por volta dos instantes de 80 e 100 s. Ao reestabelecer a energia elétrica do semáforo que estava *off-line* na rede, o mesmo entra no modo de ALERTA e só entra em funcionamento normal



(a) Sem onda verde.



(b) Com onda verde.

Figura 4.6 – Desligamento do fornecimento de energia elétrica, para interseções SIMPLES-MD.

ao realizar a troca da mensagem *MSG9* com o seu mestre/escravo, situação prevista pelo método descrito na Subseção 3.3.1.1.

Ao analisar o mesmo tipo de interseção em uma avenida que possui onda verde em duas interseções sucessivas, removendo-se a fonte de alimentação dos semáforos mestres de cada interseção em intervalos diferentes, o sistema semaforico emite os sinais vistos

na Figura 4.6b. Neste teste manteve-se os tempos dos GFV do teste sem onda verde, porém o sinal do GFV1 refere-se ao semáforo mestre da interseção  $I_0$ , com tempo de início de 0 s e o sinal do GFV2 refere-se ao sinal do semáforo mestre da interseção  $I_1$ , com o tempo de início de 15 s. Ao remover o fornecimento de energia elétrica do semáforo mestre da interseção  $I_0$ , não ocorre nenhuma mudança no funcionamento do semáforo mestre da interseção  $I_1$ . O mesmo ocorre ao cortar a alimentação do semáforo da interseção  $I_1$ , ou seja, o semáforo da interseção anterior, interseção  $I_0$ , opera normalmente. Nessa situação a falha semafórica é reportada ao coordenador da rede por meio dos semáforos escravos situados na interseção que houve a falha. Novamente, ao reestabelecer a energia elétrica o semáforo entra imediatamente em modo de ALERTA e, em se tratando de onda verde, aguarda o instante de tempo exato para entrar no modo de funcionamento normal. Portanto o sincronismo que havia entre os semáforos antes de cortar a alimentação de ambos (comportamento observado durante os instantes de tempo inferiores a 20 s), restaurou-se após eles retomarem o seu funcionamento normal (comportamento observado durante os instantes de tempo superiores a 80 s).

Por fim, para realizar o teste de perdas dos dados de comunicação sem fio entre os semáforos em pleno funcionamento, ou seja, ambos conectados constantemente à fontes de alimentação e para essa situação inseriu-se os módulos de acionamento de relés eletromecânicos para chavear apenas a fonte de alimentação de 5 V dos módulos de RF. A Figura 4.7 mostra a atuação dos dois semáforos de uma interseção SIMPLES-MD sem onda verde, com os mesmos tempos das luzes verde, amarela e vermelha do teste anterior, em face das perdas dos dados da comunicação sem fio.

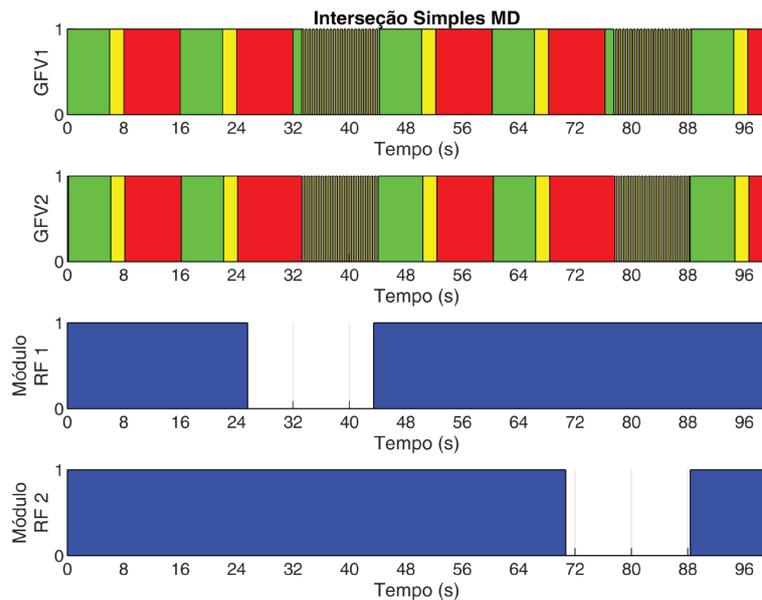


Figura 4.7 – Perda dos dados da comunicação sem fio.

Os sinais com os dizeres “Módulo RF 1” e “Módulo RF 2” quando em “1” simbolizam que o módulo de RF está funcionando normalmente, porém quando em “0” significa que houve falha na comunicação sem fio, corrompendo e/ou impossibilitando realizar a comunicação entre os semáforos por completo. Nesse teste, os valores de “1” e “0” dos sinais “Módulo RF 1” e “Módulo RF 2” também foram extraídos pelo analisador lógico dos pinos de entrada dos módulos de relés eletromecânicos, permitindo detectar o momento exato em que o módulo de RF deixa de operar. Assim sendo, em um primeiro momento, quando o GFV1 (mestre do cruzamento) perde a comunicação com o seu escravo e novamente não há troca da mensagem *MSG9* entre escravo/mestre em um tempo menor ou igual ao tempo do estado atual acrescido de um segundo, ele imediatamente entra no modo de ALERTA e que por não ser capaz de se comunicar com o seu escravo, os seus semáforos escravos também entraram em modo de ALERTA. Só após o mestre voltar a se comunicar com os demais semáforos do cruzamento é que ele e os demais semáforos voltarão a operar normalmente. Toda análise também é válida para o caso de um semáforo escravo perder a comunicação com os demais, conforme o comportamento do sistema semafórico durante os instantes superiores a 70 s.

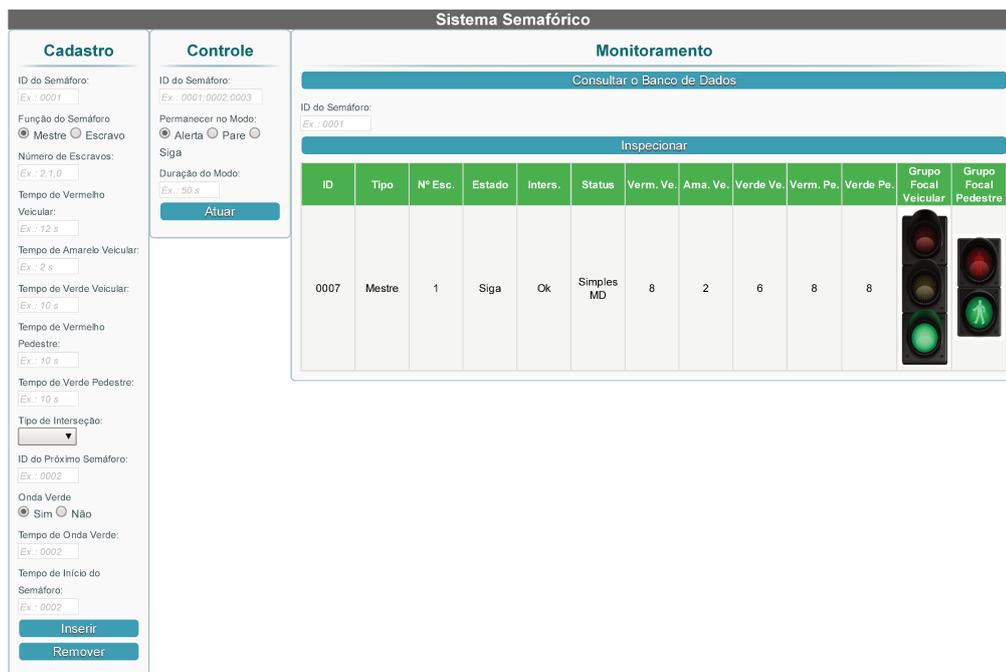
## 4.6 Interface web

Com o intuito de facilitar a gerência de todos os semáforos ativos na rede XMesh, foi elaborada uma interface do tipo *web* em um computador pessoal conectado à rede local, cujo resultado final pode ser visto na Figura 4.8. Uma vez que a rede XMesh baseia-se na estrutura de um banco de dados, nesse caso contido no dispositivo *gateway* do sistema, que possui dentre outras informações, tabelas de dados com os valores de configuração do semáforos cadastrados, tabelas de leituras exclusivas para todos os seus dispositivos de cada VPDN e tabelas de comandos particulares também para cada VPDN, criou-se um *script* para manipular e exibir tais dados.

O *script* criado fez o uso da linguagem de programação apropriada para o desenvolvimento *web*, a linguagem *Hypertext Preprocessor* (PHP). Assim sendo, por meio de comandos em *Structured Query Language* (SQL) ou linguagem de consulta estruturada, executados por funções específicas em PHP foi possível estabelecer a conexão com o banco de dados, que possui todos os dados dos dispositivos *on-line* na rede XMesh e inserir, ou remover, ou atualizar, ou apenas selecionar as informações desejadas pelo usuário. Após a extração dos dados desejados de suas respectivas tabelas, fez-se o uso da *HyperText Markup Language* (HTML) uma linguagem de marcação dedicada à estruturação de páginas *web* para exibir os dados em regiões específicas da tela, em formatos de tabelas, com cores e imagens específicas.

Em sua primeira página, a interface *web* do sistema semafórico possui um

campo para cadastro, um para controle e um para o monitoramento dos semáforos. Para inserir um semáforo no sistema, deve-se preencher todos os campos da área de “Cadastro” e ao final clicar em “Inserir”. Para remover um semáforo, basta apenas informar o seu identificador (ID) e clicar em “Remover”. Na área de “Controle” é possível fazer com que o semáforo com o ID específico permaneça em três modos possíveis, durante um intervalo de tempo (em segundos) desejado, bastando apenas preencher os campos corretamente e clicar em “Atuar”. Na área de monitoramento é possível consultar todos os semáforos cadastrados no sistema clicando em “Consultar o Banco de Dados”, saltando para a segunda página da interface *web* do sistema semafórico, conforme a Figura 4.8b. Os dados visualizados na Figura 4.8b são dados dos semáforos cadastrados para a realização dos testes com oito interseções SIMPLES-MU em onda verde. Por fim, ao inserir o ID do semáforo e clicar em “Inspeccionar”, é possível verificar em tempo real (atualizado a cada 1 s) o estado de funcionamento do semáforo, conforme a Figura 4.8a.



(a) Primeira página.

**Sistema Semafórico**

**Semáforos Cadastrados**

ID	Tipo	Nº Escravos	Tempo Vermelho Veicular	Tempo Amarelo Veicular	Tempo Verde Veicular	Tempo Vermelho Pedestre	Tempo Verde Pedestre	Tipo de Interseção	ID Próximo Semáforo	Onda Verde
0007	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	0007	0
0008	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	0008	15
0009	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	0009	43
000B	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	000B	90
000C	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	000C	79
000D	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	000D	99
0002	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	0002	55
0006	Mestre	0	12	2	10	12	12	Simple MU	0006	81

Voltar

(b) Segunda página.

Figura 4.8 – Interface *web* do sistema semafórico.

## Conclusão

Ao término deste capítulo, todos os tipos de interseções estudadas no Capítulo 2, implementadas em até oito PCIs, especificadas no Capítulo 3, no interior do LSERF foram testadas sob as condições descritas anteriormente, cujos resultados se aproximaram dos seus diagramas temporais teóricos.

## 5 Conclusões

*Neste capítulo é descrita a relevância dos dados, são efetuadas propostas para o desenvolvimento de futuros trabalhos bem como o encerramento da Dissertação.*

### 5.1 Balanço

Ao longo do trabalho desenvolvido estipularam-se algumas metas para conduzir aos objetivos propostos. As metas alcançadas foram:

- Estudar os principais tipos de interseções semaforicas: diversas interseções foram apresentadas, tanto em nível de estudos científicos, gerenciando as trajetórias dos veículos para evitar conflitos, quanto em nível de análise técnica, por meio de seus diagramas temporais e de estágios;
- Desenvolver um circuito eletrônico controlador de semáforos genérico: esperava-se ter um circuito eletrônico para controlar e monitorar semáforos via rede sem fio. Os circuitos propostos na Seção 3.2 foram produzidos e testados. Embora os resultados expostos no Capítulo 4 foram monitorados por um analisador lógico conectado aos terminais de saída para as lâmpadas DC, os mesmos comportamentos de controle e monitoramento foram observados para os circuito de lâmpadas AC;
- Realizar a comunicação semaforica por meio de uma rede sem fio: ao adotar a rede XMesh, todo o *firmware* foi desenvolvido para operar sob o protocolo M4IoT, cujo protocolo de comunicação semaforica descrito na Seção 3.3 foi testado em sua totalidade. Elaborou-se comunicações semaforicas do tipo MEP e MET para que o sistema proposto fosse capaz de operar num cenário real de uma cidade com vários tipos de interseções, desde as mais simples até as mais complexas;
- Implementar a programação da progressão semaforica em tempo real: o modelo matemático desenvolvido para realizar a operação de onda verde em uma avenida foi baseado nos trabalhos de (YINFEI, 2009; BOUDERBA; MOUSSA, 2018). Os resultados dos testes dos oito semáforos configurados para as interseções SIMPLES-MU e interseção em CRUZ-MD/MD mostraram que o modelo proposto é capaz de sincronizar todos os semáforos em onda verde, independente do tipo de interseção utilizada;
- Elaborar rotinas de segurança do sistema: de forma à prevenir acidentes de trânsito em cruzamentos causados por possíveis problemas no sistema semaforico, diversas

rotinas de segurança foram apresentadas na Seção 3.6. Além da rede XMesh possuir vários níveis de segurança, o *firmware* elaborado foi capaz de entrar no modo ALERTA (amarelo intermitente) para o caso de haver a inoperância de um semáforo da interseção, bem como uma falha de comunicação do módulo de RF, conforme os resultados do Capítulo 4.

Como resultados atinentes à dissertação e requisitos da Coordenadoria de Pós-Graduação da FEEC, foram elaborados os seguintes trabalhos:

- Publicação de um artigo científico em uma Conferência internacional: *Smart Traffic Light Controller System* em *6th IEEE International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security - IoTSMMS 2019*, indexada à base de dados do IEEE Xplore;
- Artigo científico aceito para ser publicado em uma revista científica: *Development of a Smart Traffic Light Control System with Real-Time Monitoring* em *IEEE Internet of Things Journal*, com Qualis CAPES A1;

Além disso, por meio da Agência de Inovação da Unicamp (INOVA) realizou-se o registro de programa de computador no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) do *firmware* desenvolvido para esta dissertação de mestrado, intitulado “Sistema Semafórico”, com mais de 2,5 mil linhas de código escritas em linguagem C.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Na medida em que a presente dissertação propôs o desenvolvimento de um sistema semafórico sem fio aplicado à cidades inteligentes, há o desejo de continuar elaborando o desenvolvimento de futuros trabalhos.

Nessa perspectiva, dado ao fato desse trabalho de dissertação já ter desenvolvido todas as lógicas de comunicação entre semáforos, disponibilizando até uma interface *web*, uma possível proposta de trabalho futuro seria o desenvolvimento de um dispositivo sensor eletrônico capaz de realizar não só a contagem dos veículos que trafegam em uma avenida, mas também a medição da velocidade média desses veículos. Desse modo esse dispositivo utilizaria a mesma rede XMesh dos semáforos, mas em outra VPDN, para enviar tais valores para a central de gestão semafórica.

De forma a contribuir para as pesquisas na área de IoV, utilizando uma VPDN disponível na rede XMesh, outro projeto interessante seria a criação de um dispositivo eletrônico equipado com diversos sensores localizado em veículos públicos, como viaturas

policiais e ambulâncias, para que em situações de urgência, tais veículos emitissem mensagens de requisição de prioridade para a central de gestão, que por sua vez criaria rotas exclusivas para a sua locomoção.

A criação de um algoritmo que, baseado nas informações enviadas pelos sensores de fluxo veiculares, seja capaz de ajustar os tempos de cada ciclo de operação dos semáforos e os tempos de início para o caso de semáforos em onda verde, seria outra proposta. Nesse caso, tal algoritmo seria executado na central de gestão semafórica, local onde estaria toda a informação do sistema semafórico da cidade.

Por fim, a realização de testes do sistema semafórico desenvolvido em um ambiente real de um semáforo, isto é, exposto ao sol e chuva, durante vários dias controlando GFVs e GFPs de semáforos comerciais seria de extrema importância, podendo verificar se o circuito eletrônico é capaz de controlar e monitorar os GFVs e GFPs corretamente, se é capaz de manter o funcionamento normal (projetado de acordo com os dados fornecidos pelo *gateway* do sistema) exposto à altas temperaturas e por fim avaliar a qualidade dos sinais de RF durante dias chuvosos.

### 5.3 Conclusão

A gestão do trânsito urbano é uma atividade que requer não apenas soluções técnicas, mas também um olhar científico sobre as causas que originam a ineficiência do trânsito e suas possíveis maneiras de correção. Nesse sentido, a eficiência na gestão de tráfego será tão eficaz quanto forem as soluções tecnológicas empregadas. O estudo sobre os principais tipos de interseções urbanas com a sua posterior aplicação em um dispositivo controlador de semáforos é uma das principais contribuições desta obra, devido a maioria dos trabalhos relacionados à controladores semafóricos implementarem apenas um tipo específico de cruzamento.

Por meio de módulos de RF, a forma como a troca de mensagens foi estabelecida entre os semáforos também distinguiu-se dos demais artigos existentes, permitindo realizar a detecção do estado de funcionamento de qualquer semáforo ativo na rede sem qualquer conexão física existente entre eles.

O desenvolvimento dos circuitos atuadores e sensores tanto de lâmpadas AC, quanto de DC, mostraram-se funcionais, conforme o Capítulo 4. Isto posto, em uma possível aplicação em um cenário real, além do *hardware* desenvolvido ser flexível à ponto de operar lâmpadas AC/DC, possuir baixo custo financeiro (Seção 3.2.4), eliminar milhares de quilômetros de cabos de comunicação (Seção 2.3), o sistema semafórico identifica pontualmente o semáforo que possui problemas em seu funcionamento. Logo, todas essas características fazem do projeto proposto uma alternativa economicamente atrativa.

O fato do sistema semafórico não apenas controlar uma interseção, mas também estar apto a operar em onda verde contribui para a diminuição do tempo de viagem, do consumo de combustível e da poluição ambiental e sonora dos veículos rodoviários. Além disso, o ciclo de operação de todos semáforos pode ser atualizado em tempo real por uma unidade central, permitindo sua adequação a cruzamentos longos, ajuste no tempo de abertura ao longo do dia, priorizar a travessia de usuários com dificuldade de locomoção ou ainda operar em condições extraordinárias como no fechamento de avenidas para eventos públicos.

O desenvolvimento de um sistema controlador de semáforos sem fio, com monitoramento e progressão semafórica em tempo real aplicado à cidades inteligentes, portanto, além de possibilitar a sua integração com outras tecnologias de IoT e IoV, permite não só maximizar a eficiência na gestão de trânsito, reduzindo as poluições ambientais e sonoras, mas também aprimorar as técnicas de comunicação entre diversos sistemas eletrônicos, transformando grandes centros urbanos em cidades inteligentes.

## Referências

ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 55, n. 9, p. 34–40, Sep. 2017. ISSN 1558-1896. Citado na página 38.

AFONSO, J. A.; MAIO, A. J. F.; SIMOES, R. Performance evaluation of bluetooth low energy for high data rate body area networks. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 90, n. 1, p. 121–141, Sep 2016. ISSN 1572-834X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11277-016-3335-4>>. Citado na página 39.

AGARWAL, S.; SWAMI, B. Road traffic noise, annoyance and community health survey - A case study for an Indian city. *Noise and Health*, Noise and Health, v. 13, n. 53, p. 272–276, 2011. Citado na página 17.

ALAM, F. et al. Data Fusion and IoT for Smart Ubiquitous Environments : A Survey. *IEEE Access*, IEEE, v. 5, p. 9533–9554, 2017. Citado na página 17.

ALI, A. I. et al. Zigbee and lora based wireless sensors for smart environment and iot applications. In: *2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 19–23. Citado na página 38.

ALMEIDA, A. F. M.; MENESES, H. B. Avaliação da progressão semafórica em tempo real nos períodos de média e alta demanda de tráfego: Estudo de caso. *Associação Nacional de Transportes Públicos – ANTP*, ANTP, p. 1–8, 2007. Citado na página 59.

ANTP. *Sistema de Informações da Mobilidade Urbana*. 2014. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/sistema-de-informacoes-da-mobilidade/apresentacao.html>>. Citado na página 19.

ANTP. Relatório comparativo 2003-2014. *Associação Nacional de Transportes Públicos – ANTP*, ANTP, p. 1–36, 2016. Citado na página 19.

ARC, S. *Diário Oficial da Cidade de São Paulo*. 2019. Disponível em: <<https://www.imprensaoficial.com.br>>. Citado na página 50.

AZEREDO, L. E. *Seis Fatores Essenciais para o Sincronismo entre Semáforos*. 2014. Disponível em: <[http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/seis\\_fatores.pdf](http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/seis_fatores.pdf)>. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 35.

BANI YOUNES, M.; BOUKERCHE, A. Intelligent traffic light controlling algorithms using vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 65, n. 8, p. 5887–5899, Aug 2016. Citado na página 31.

BANKOV, D.; KHOROV, E.; LYAKHOV, A. On the limits of lorawan channel access. In: *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 10–14. ISSN null. Citado na página 38.

BATTARRA, R.; ZUCARO, F.; TREMITERRA, M. R. Smart mobility: An evaluation method to audit Italian cities. *5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2017 - Proceedings*, IEEE, p. 421–426, 2017. Citado na página 24.

- BBC. *The man who gave us traffic lights*. 2009. Disponível em: <[http://www.bbc.co.uk/nottingham/content/articles/2009/07/16/john\\_peake\\_knight\\_traffic\\_lights\\_feature.shtml](http://www.bbc.co.uk/nottingham/content/articles/2009/07/16/john_peake_knight_traffic_lights_feature.shtml)>. Citado na página 31.
- BORIBOONSOMSIN, B.; BARTH, M. Real-World CO<sub>2</sub> Impacts of Traffic Congestion. *Transportation Research Record*, Transportation Research Record, n. 951, p. 1–23, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 31.
- BOUDERBA, S. I.; MOUSSA, N. Impact of green wave traffic light system on v2v communications. In: *2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 82.
- CASTRO, M.; JARA, A. J.; SKARMETA, A. F. G. Smart Lighting solutions for Smart Cities. *27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, IEEE, p. 1374–1379, 2013. Citado na página 24.
- CET. *Revitalização Semafórica*. 2013. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/consultas/seguranca-e-mobilidade/revitalizacao-semaforica.aspx>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 31.
- CET. *Sinalização Semafórica*. 2013. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/209128/reestruturacao-semaforica.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 20, 31 e 32.
- CHAKRABORTY, D. et al. Toward distributed service discovery in pervasive computing environments. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 97–112, Feb 2006. ISSN 2161-9875. Citado na página 65.
- CHEN, C. et al. Driver’s intention identification and risk evaluation at intersections in the internet of vehicles. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1575–1587, June 2018. Citado na página 33.
- CHEN, L.; CHANG, C. Cooperative traffic control with green wave coordination for multiple intersections based on the internet of vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, IEEE, v. 47, n. 7, p. 1321–1335, July 2017. ISSN 2168-2216. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 58.
- CHEN, L.; SHARMA, P.; TSENG, Y. Dynamic traffic control with fairness and throughput optimization using vehicular communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 31, n. 9, p. 504–512, Sep. 2013. Citado na página 58.
- CHENG, J. et al. Routing in internet of vehicles: A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 16, n. 5, p. 2339–2352, Oct 2015. Citado na página 58.
- COLORNI, A. et al. Service design in electric vehicle sharing: evidence from Italy. *IET Intelligent Transport Systems*, IET, v. 9, n. 2, p. 145–155, 2015. ISSN 1751-956X. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-its.2013.0034>>. Citado na página 24.
- COMMUNITY, I. S. C. *Leading the LTE IoT evolution to connect the massive Internet of Things*. 2018. Disponível em: <<https://www.ieee.org/membership-catalog/productdetail/showProductDetailPage.html?product=CMYSC764&N=4294925450+4294925418&tcType=General>>. Citado na página 18.

CONTRAN, C. N. D. T. *Sinalização Semafórica*. [S.l.]: Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 25, 28, 31, 49, 67 e 72.

CONTRANSIN. *Controlador Semafórico Digital Microprocessado e Centralizado*. 2019. Disponível em: <<https://www.contransin.com.br/produtos/controladores-semaforicos/>>. Citado na página 50.

CUNHA, J. P. P. *Sistema de Comunicação Wireless para Controlo e Gestão de Tráfego*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 35, 37, 40, 43, 64 e 67.

CUNHA, J. P. P. et al. Traffic light using multiple wireless technologies. *Conference on Electronics, Telecommunications and Computers*, ICREPQ, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 64.

CUNHA, J. P. P. et al. Wireless technologies for controlling a traffic lights prototype. In: *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 866–871. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 64.

CUNHA, J. P. P.; CARDEIRA, C.; MELICIO, R. Traffic lights control prototype using wireless technologies. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, ICREPQ, p. 1031–1036, 05 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 64.

DNIT, I. D. P. R. *Manual de Projeto de Interseções*. [S.l.]: DNIT, 2005. Citado na página 25.

EL-SAYED, H.; THANDAVARAYAN, G. Congestion detection and propagation in urban areas using histogram models. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 5, p. 3672–3682, Oct 2018. Citado na página 58.

EVANS, D. The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. *Cisco Internet Business Solutions Group*, Cisco, n. April, 2011. Citado na página 18.

FILHO, H. H. T. *Análise comparativa do potencial de sistemas centralizados para controle de tráfego no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2002. Citado na página 18.

FREITAS, A. et al. Smart mobility: A survey. *Internet of Things for the Global Community, IoTGC 2017 - Proceedings*, IEEE, 2017. Citado na página 24.

GARCÍA-ORELLANA, C. J. et al. Monitoring an isolated solar water pumping system through iot. In: *2018 XIII Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAAE)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–8. Citado na página 47.

HAMILTON, A. et al. *The Evolution of Urban Traffic Control: Changing Policy and Technology*. [S.l.]: Transport. Plan. Techn., 2013. Citado na página 57.

HUANG, Y.; WENG, Y.; ZHOU, M. Modular design of urban traffic-light control systems based on synchronized timed petri nets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 530–539, April 2014. Citado na página 58.

HUNT, P. B. et al. *The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique*. [S.l.]: Traffic Eng. Control., 1982. Citado na página 58.

IEEE. Ieee standard for low-rate wireless networks. *IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)*, IEEE, p. 1–709, April 2016. Citado na página 37.

INSTITUTE, T. *Special Report: The Internet of Things*. 2014. Disponível em: <<http://theinstitute.ieee.org/static/special-report-the-internet-of-things>>. Citado na página 17.

JAGADEESH, Y. M. et al. Smart autonomous traffic light switching by traffic density measurement through sensors. In: *2015 International Conference on Computers, Communications, and Systems (ICCCS)*. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 123–126. Citado na página 32.

JEON, K. E. et al. Ble beacons for internet of things applications: Survey, challenges, and opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 811–828, April 2018. Citado na página 39.

KEERTHI, K.; SURENDIRAN, B. Elliptic curve cryptography for secured text encryption. In: *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 1–5. Citado na página 69.

KHEKARE, G. S. Design of emergency system for intelligent traffic system using vanet. In: *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1–7. ISSN null. Citado na página 36.

LAHADE, S. V.; HIREKHAN, S. R. Intelligent and adaptive traffic light controller (ia-tlc) using fpga. In: *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 618–623. Citado na página 32.

LEE, J.; KIM, J.; SEO, J. Cyber attack scenarios on smart city and their ripple effects. In: *2019 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)*. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 1–5. Citado na página 68.

LI, C.; SHIMAMOTO, S. An open traffic light control model for reducing vehicles  $CO_2$  emissions based on etc vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 61, n. 1, p. 97–110, Jan 2012. ISSN 0018-9545. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.

LIN, T.; RIVANO, H.; LE MOUËL, F. A Survey of Smart Parking Solutions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 18, n. 12, p. 3229–3253, 2017. ISSN 15249050. Citado na página 24.

PAULO D. G. LUZ, LEANDRO T. MANERA e MAURICIO M. DONATTI. *Dispositivo de Monitoramento da Rede Pública de Iluminação, Sistema de Monitoramento e Gerenciamento da Rede Pública de Iluminação e Método de Comunicação Sem Fio*. 2017. BR 10 2017 023482 7. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 64.

PAULO D. G. LUZ, LEANDRO T. MANERA e MAURICIO M. DONATTI. *G4IoT - Concentrador de Sensores e Atuadores para Cidades Inteligentes baseado no protocolo M4IoT*. 2019. BR 51 2019 002181 9. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 64.

PAULO D. G. LUZ, LEANDRO T. MANERA e MAURICIO M. DONATTI. *SA4IoT - Controlador de Sensores e Atuadores para Cidades Inteligentes baseado no protocolo M4IoT - Dispositivo*. 2019. BR 51 2019 002028 6. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 64.

- MARTINS, J. F. C. *Seleção de Interseções com Potencial de Redução da Sinistralidade - Aplicação do HSM*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013. Citado na página 26.
- MEGALINGAM, R. K. et al. Smart traffic controller using wireless sensor network for dynamic traffic routing and over speed detection. In: *2011 IEEE Global Humanitarian Technology Conference*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 528–533. ISSN 978-0-7695-4595-0. Citado na página 35.
- MIRON-ALEXE, V. Comparative study regarding measurements of different ac current sensors. In: *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1–6. Citado na página 47.
- MOEINI, H.; YEN, I.; BASTANI, F. Routing in iot network for dynamic service discovery. In: *2017 IEEE 23rd International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 360–367. ISSN 1521-9097. Citado na página 65.
- MOHANTY, S. P. Smart Technologies: The Key for Sustainable Smart Cities. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, IEEE, v. 7, n. march, p. 3–4, 2018. Citado na página 18.
- MOHANTY, S. P.; CHOPPALI, U.; KOUKIANOS, E. Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, IEEE, v. 5, n. August, p. 60–70, 2016. Citado na página 18.
- MORENO, L. D.; MAMEDE, B. B.; FILHO, A. C. P. Automação de Semáforos para uma Melhor Dinâmica Urbana. *Revista dos Transportes Públicos*, ANTP, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 58.
- NATIONS, U. World urbanization prospects: The 2018 revision. *Economic & Social Affairs*, p. 1–2, 2018. Citado na página 17.
- NETO, J. C. *Semáforo: Ser ou não inteligente ? Uma comparação entre o controle semafórico em tempos fixos e o em tempo real*. [S.l.]: Companhia de Engenharia de Tráfego, 2016. 1–33 p. Citado 3 vezes nas páginas 19, 31 e 32.
- NEWMAN, P. *How Internet of Things technology growth is reaching mainstream companies and consumers*. 2018. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report>>. Citado na página 20.
- L. F. P. OLIVEIRA, P. D. G. LUZ e L. T. MANERA. *Sistema Semaforico*. 2020. BR 51 2020 000162 9. Citado na página 51.
- OLIVEIRA, L. F. P.; MANERA, L. T.; LUZ, P. D. G. Smart traffic light controller system. In: *2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS)*. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 155–160. ISSN null. Citado na página 49.
- OXFORD, D. *Semaphore*. 2019. Disponível em: <<https://en.oxforddictionaries.com/definition/semaphore>>. Citado na página 31.
- PINEDO-FRAUSTO, E. D.; GARCIA-MACIAS, J. A. An experimental analysis of zigbee networks. In: *2008 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 723–729. ISSN 0742-1303. Citado na página 38.

- PROSKOCHYLO, A. et al. Overview of wireless technologies for organizing sensor networks. In: *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S T)*. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 39–41. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- PUVIARASI, R. et al. Design of intelligent traffic controlling system using rf transponder. In: *2018 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–5. ISSN 978-1-5386-4606-9. Citado na página 36.
- QI, L.; ZHOU, M.; LUAN, W. Emergency traffic-light control system design for intersections subject to accidents. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 17, n. 1, p. 170–183, 2016. ISSN 15249050. Citado 5 vezes nas páginas 17, 34, 35, 40 e 58.
- QUALCOMM. *Leading the LTE IoT evolution to connect the massive Internet of Things*. 2018. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/leading-the-lte-iot-evolution-to-connect-the-massive-internet-of-things.pdf>>. Citado na página 18.
- RANI, L. P. J. et al. Dynamic traffic management system using infrared (IR) and Internet of Things (IoT). *3rd IEEE International Conference on Science Technology, Engineering and Management*, IEEE, p. 353–357, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 58.
- RATSIMOR, O. et al. Allia: Alliance-based service discovery for ad-hoc environments. *Proceedings of the ACM International Workshop on Mobile Commerce*, ACM, 10 2002. Citado na página 65.
- RENUKA, R.; DHANALAKSHMI, S. New smart parking system based on resource allocation and reservations. *International Journal of Applied Engineering Research*, IEEE, v. 9, n. 21, p. 5144–5150, 2013. ISSN 09739769. Citado na página 24.
- RIDA, N. et al. Adaptive traffic light control system using wireless sensors networks. In: *2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 552–556. ISSN 2327-185X. Citado na página 35.
- RUDRAWAR, O. et al. Smart street lighting system with light intensity control using power electronics. In: *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- RUTA, M. et al. A knowledge fusion approach for context awareness in vehicular networks. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 4, p. 2407–2419, Aug 2018. Citado na página 58.
- SCHRANK, D. et al. Urban mobility. *Urban Mobility Scorecard*, n. August, p. 1–39, 2015. Disponível em: <<http://d2dtl5nnlpfr0r.cloudfront.net/tti.tamu.edu/documents/mobility-scorecard-2015-wappx.pdf>>. Citado na página 18.
- SCRIPCARIU, L. et al. Aes vulnerabilities study. In: *2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–4. Citado na página 68.

SEMANJSKI, I.; MANDZUKA, S.; GAUTAMA, S. Smart mobility. In: *2018 International Symposium ELMAR*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 63–66. ISSN 1334-2630. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 23.

SHAAMILI, R.; RANJITH, R.; SUPRIYA, P. Intelligent traffic light system for unhampered mobility of emergency vehicles. In: *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 360–363. ISSN null. Citado na página 36.

SILVA, G. P. B. *Traffic Bee: Proposta de Aplicação da Tecnologia ZigBee em Sistema Inteligente de Semáforos*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 35, 40, 43 e 64.

STMICROELECTRONICS. *STM32F103x8 STM32F103xB*. 2015. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 46.

STOJMENOVIC, I. *Handbook of sensor networks: algorithms and architectures*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005. v. 49. Citado na página 64.

SUNDAR, R.; HEBBAR, S.; GOLLA, V. Implementing Intelligent Traffic Control System for Congestion Control , Ambulance Clearance , and Stolen Vehicle Detection. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 1109–1113, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 64.

TEXAS INSTRUMENTS. *TI SimpleLink Sub-1 GHz Wireless Solutions for the IoT: Robustness & Long Range*. 2013. Disponível em: <<https://training.ti.com/ti-simplelink-sub-1-ghz-wireless-solutions-iot-technical-introduction-level-1>>. Citado na página 36.

VILANOVA, L. *Crerios para a Implantação de Semáforos*. 2007. Disponível em: <[http://sinaldetransito.com.br/artigos/criterios\\_implantacao\\_semaforos.pdf](http://sinaldetransito.com.br/artigos/criterios_implantacao_semaforos.pdf)>. Citado na página 26.

VOAS, J.; AGRESTI, B.; LAPLANTE, P. A. A closer look at the iot’s “ things ”. *IT Professional*, IEEE, v. 20, n. June, p. 11–14, 2018. Citado na página 17.

WANG, Q. et al. Roadside magnetic sensor system for vehicle detection in urban environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 19, n. 5, p. 1365–1374, 2018. ISSN 15249050. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 40.

WANG, X. et al. Optimizing content dissemination for real-time traffic management in large-scale internet of vehicle systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 68, n. 2, p. 1093–1105, Feb 2019. ISSN 0018-9545. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 58.

WEI, Z. et al. Velocity Prediction of an Intelligent & Connected Vehicle for a Traffic Light Distance on the Urban Road. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, PP, n. to be published, p. 1–15, 2018. ISSN 1524-9050. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 58.

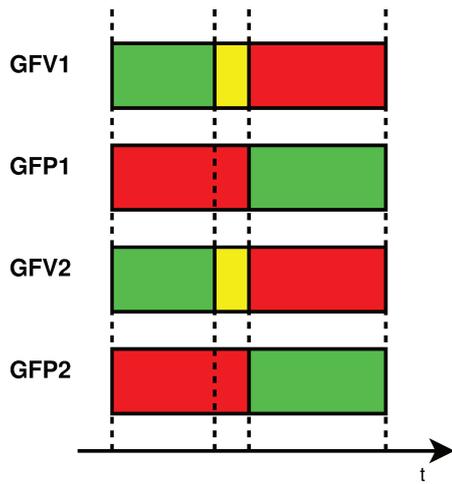
XIA, F. et al. Modeling and Analysis of Large-Scale Urban Mobility for Green Transportation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 14, n. 4, p. 1469–1481, 2018. ISSN 15513203. Citado na página 25.

- YAMMEN, S.; TANG, S.; VENNAPUSA, M. K. R. Iot based speed control of smart fan. In: *2019 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT-NCON)*. [S.l.]: IEEE, 2019. p. 17–20. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- YINFEI, L. Research on synchronizing traffic signals for an urban arterial road. In: *2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application*. [S.l.]: IEEE, 2009. v. 2, p. 457–460. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 82.
- ZHENG, S.; XU, J. Research on red wave and green wave coordinated control model in arterial road for different traffic demands. In: *2011 International Conference on Multimedia Technology*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1661–1664. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.
- ZHOU, B.; CAO, J.; WU, H. Adaptive traffic light control of multiple intersections in wsn-based its. In: *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1–5. ISSN 1550-2252. Citado na página 35.

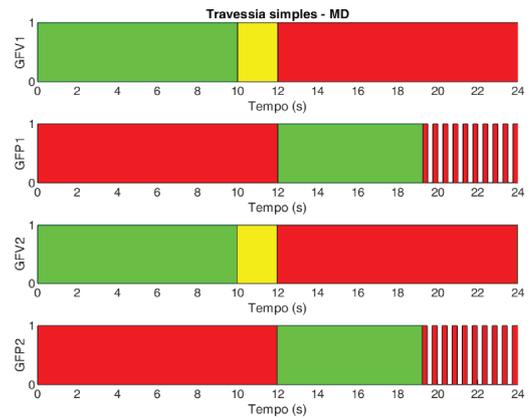
## Apêndices

# Apêndice A – Diagramas temporais dos cruzamentos estudados

## A.1 Travessia simples



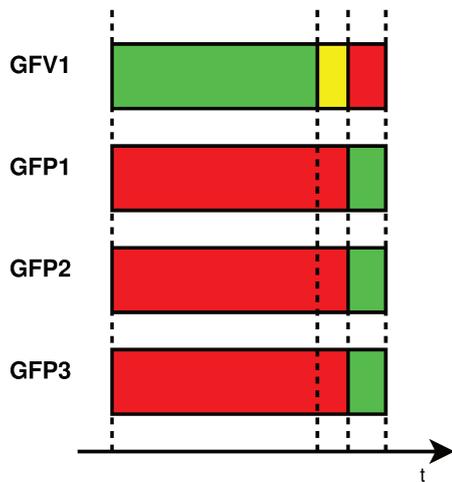
(a) Resultado teórico.



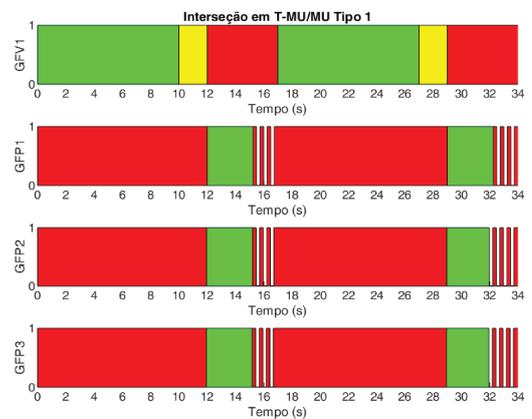
(b) Resultado prático.

Figura A.1 – Travessia SIMPLES-MD.

## A.2 Interseção em T

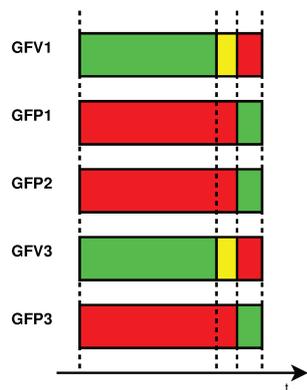


(a) Resultado teórico.

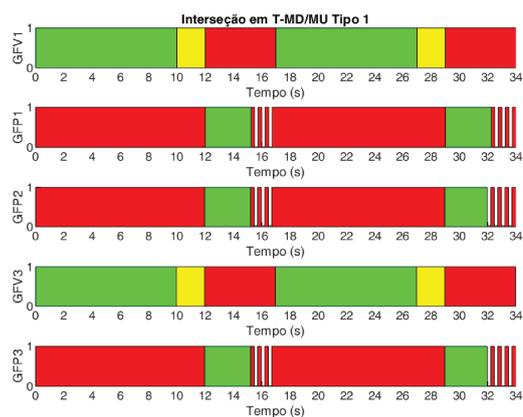


(b) Resultado prático, dois ciclos de operação.

Figura A.2 – Interseção em T-MU/MU 1.

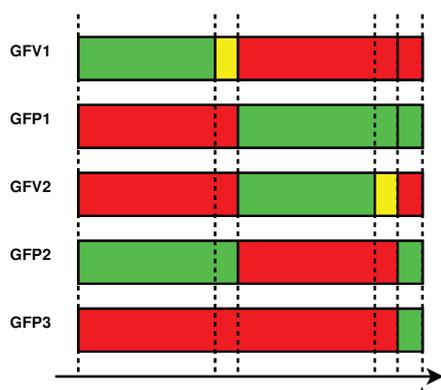


(a) Resultado teórico.

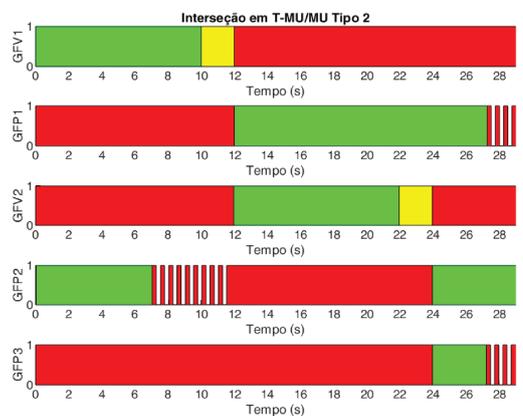


(b) Resultado prático, dois ciclos de operação.

Figura A.3 – Interseção em T-MD/MU 1.

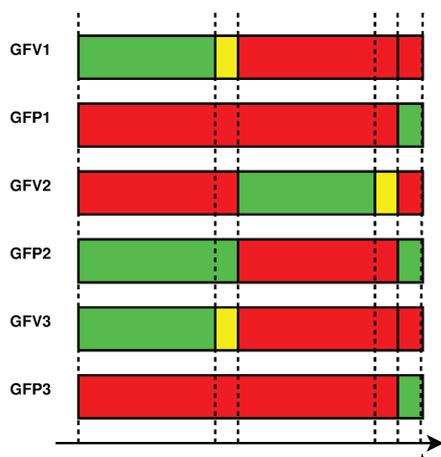


(a) Resultado teórico.

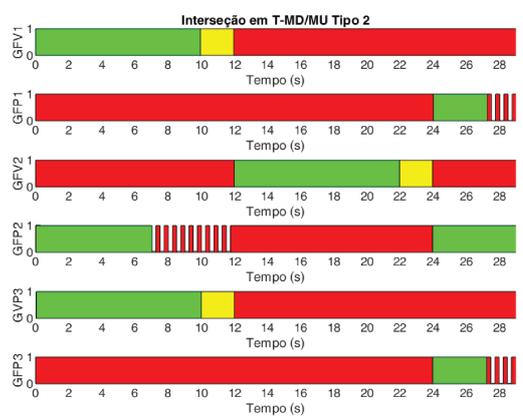


(b) Resultado prático.

Figura A.4 – Interseção em T-MU/MU 2.



(a) Resultado teórico.



(b) Resultado prático.

Figura A.5 – Interseção em T-MD/MU 2.

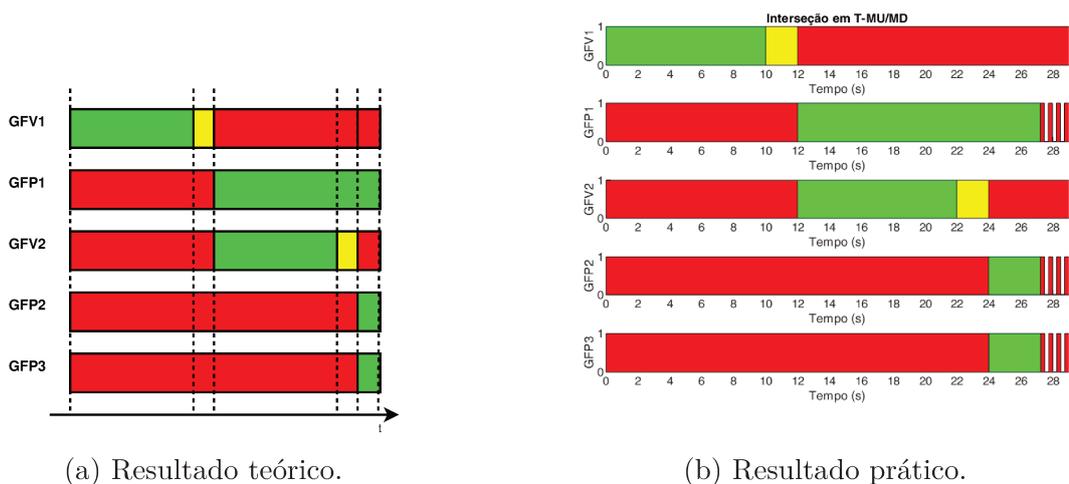


Figura A.6 – Interseção em T-MU/MD.

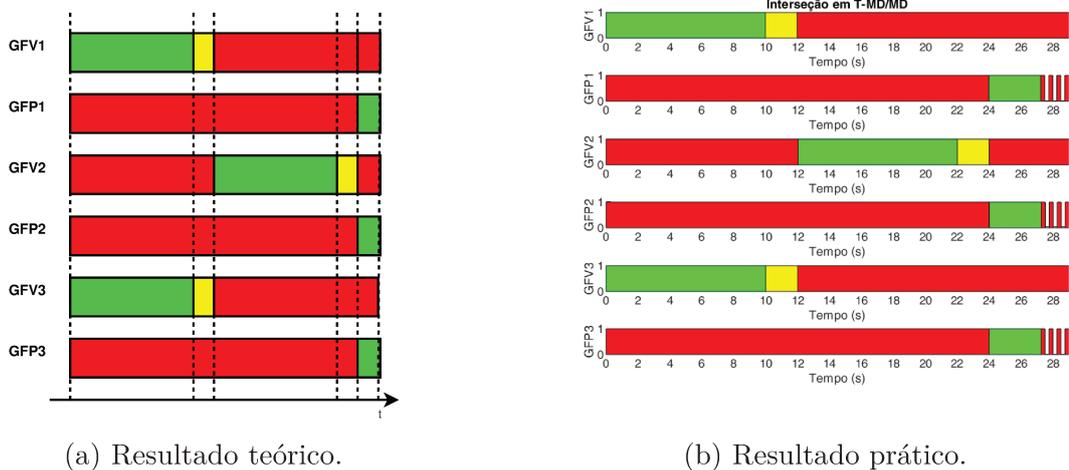


Figura A.7 – Interseção em T-MD/MD.

### A.3 Interseções em cruz

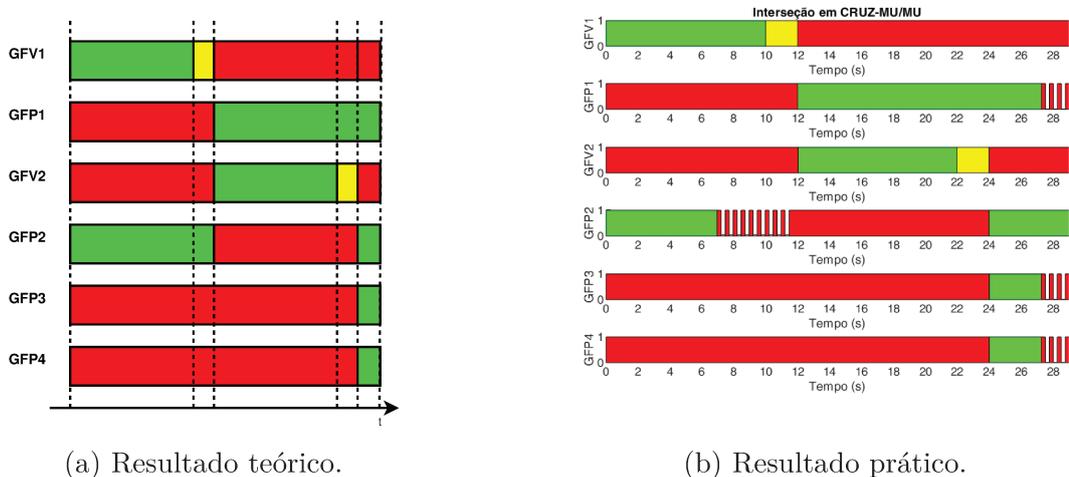
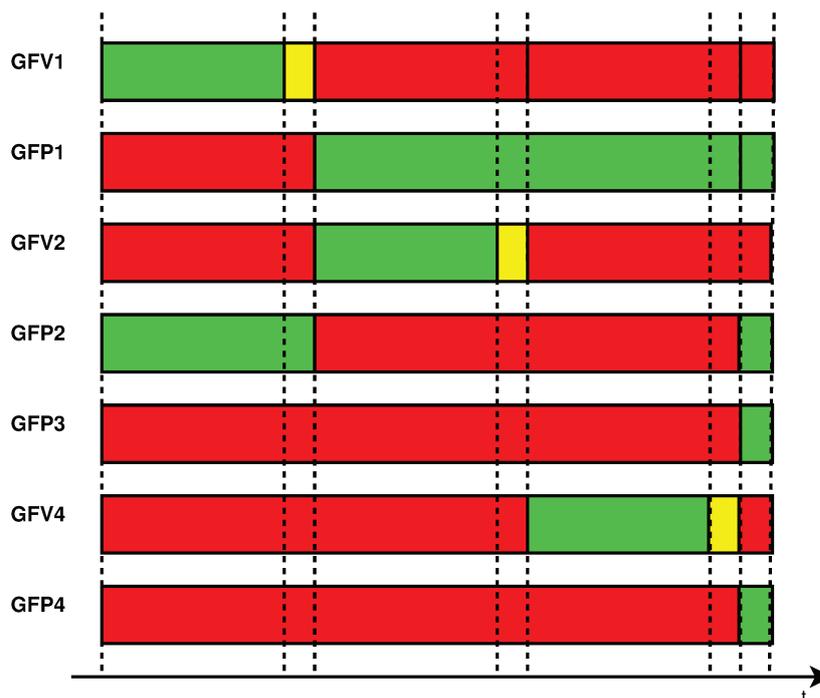
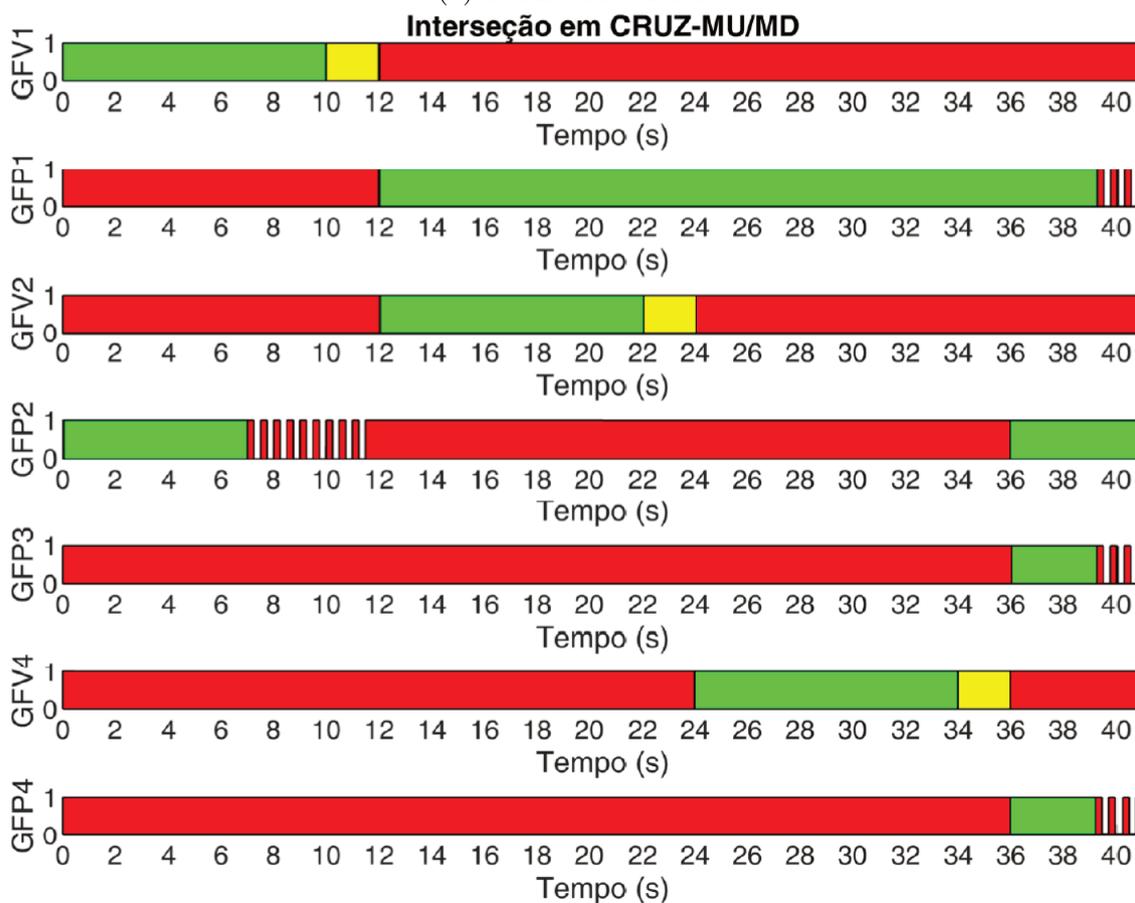


Figura A.8 – Interseção em CRUZ-MU/MU.



(a) Resultado teórico.



(b) Resultado prático.

Figura A.9 – Interseção em CRUZ-MU/MD.

## Apêndice B – Lista de componentes do circuito controlador de semáforos

Tabela B.1 – Relação de componentes de uma PCB completa.

<b>Componente</b>	<b>Identificador</b>
BC2032	BT1
100 nF	C1, C2, C4, C8, C12, C10, C11, C15, C16, C17, C18, C19
22 pF	C3, C6
8 pF	C5, C7
4,7 uF	C9
10 nF	C13
1 uF	C14
1N4007	D1, D2, D3, D4, D5
WJ500V-5.08-2P-14-00A	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11, J12
SVF2N60F	Q1, Q2, Q5, Q7, Q8
BC548	Q3, Q4, Q6, Q9, Q10, Q13, Q14, Q16, Q19, Q20
BT134	Q11, Q12, Q15, Q17, Q18
4,7 k	R1, R3
9,1 k	R2, R4, R5, R14, R19, R20
1 M	R6, R7, R12, R13, R15, R18, R21, R22, R27, R28
5,6 k	R8, R9, R16, R23, R24
3,3 k	R10, R11, R17, R25, R26
330	R29, R30, R43, R50, R51
220 k	R31, R32, R44, R52, R53
220	R33, R34, R45, R54, R55, R35, R36, R46, R56, R57
2,4 k	R37, R38, R39, R40, R47, R48, R58, R59, R60, R61
470 k	R41, R42, R49, R62, R63
STM32F103C8T6	U1
AMS1117-3.3	U2, U3
MOC3021	U4, U5, U8, U10, U11
4N25	U6, U7, U9, U12, U13
V250LA20AP	VAR1
B08000J065	Y1
Q11C02RX1001300	Y2