FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Desenvolvimento de um sistema de gestão de consumo de energia elétrica para iluminação pública baseado num sistema de *Energy Harvesting*

Alexandre Costa de Oliveira

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador externo: Dr. Francisco João Anastácio Duarte

Orientador interno: Prof. Paulo Gomes Da Costa

6 de julho de 2020

© Alexandre Oliveira, 2020

Resumo

A dificuldade em garantir um equilíbrio energético, tendo em conta as necessidades atuais da sociedade, tem sido uma das maiores preocupações desde o início do século XXI. A exploração de alternativas a fontes de energia não renováveis ou a procura de soluções que permitam minimizar os gastos energéticos de diferentes aplicações do nosso quotidiano, têm sido alvo de diversos investimentos por parte de várias empresas e instituições. Através da implementação da sua ideia, a Pavnext, sendo uma das empresas em destaque nesta aposta, promove a geração de energia proveniente de uma fonte *Energy Harvesting* (pavimento rodoviário), que pode ser aplicada com diferentes propósitos, como é o caso da iluminação pública.

O setor da iluminação pública é facilmente visto como um dos que manifesta maiores taxas de desperdícios energéticos, uma vez que, espalhados pelo mundo, são muitos os postes de iluminação que apresentam as suas lâmpadas ligadas à potência máxima, continuamente durante toda a noite, não havendo em muitos casos, necessidade para tal desaproveitamento. As preocupações atuais mencionadas, associadas ao crescimento tecnológico, especialmente direcionado para projetos em *Smart Cities*, levaram à elaboração desta dissertação.

Para além de um estudo sobre a forma como uma boa gestão do consumo da iluminação pública influencia os gastos financeiros associados e as próprias emissões de CO_2 libertadas para a atmosfera, foram também analisadas algumas empresas que se encontram na vanguarda deste setor, bem como alguns sistemas outrora sugeridos tendo em vista a resolução da mesma problemática, com o objetivo de perceber, respetivamente, as soluções atuais e futuras de mercado, e as vantagens e desvantagens de cada alternativa proposta.

Com base nesta análise, foi sugerido e descrito um sistema inovador de controlo da iluminação, tendo ainda sido construído um protótipo de regulação da luminosidade de uma lâmpada com vista à aplicação da mesma num ambiente real.

Todos os conceitos implementados ao longo desta dissertação, regem-se sempre por um principio base [1]:

"*The aim of smart street lights is to save electric power, and the aim of street lights, is to keep public or street safety´´*

Palavras-chave: Eficiência energética, Iluminação Pública, LEDs, Protocolos de comunicação, Sistemas IoT, *Smart Cities*

Abstract

It is difficult to ensure an energetic balance, taking in account the current needs of the socity, however this has been a major concern since the beginning of the 21st century. The search of alternatives to nonrenewable energy sources or solutions that could minimyze the energy costs on different applications in our daily lives, have been the target of several investments made by many companies and institutions. Being one of the the companies highlighted in this contribution, Pavnext, through the implementation of its project, promotes the generation of energy from an Energy Harvesting source (road pavement), which can be applied for different purposes, such as public lighting.

The public lighting sector is easily seen as one of those with the highest rates of energy waste, since all over the world there are many lighting poles that have their lamps turned on at maximum power continously throughout the night and, in many cases, there is no need for such a disuse. The current concerns mentioned, associated with technological growth, especially related to projects in Smart Cities, were reasin enough to build this dissertation.

In addition to a study on how a good management in the consumption of public lighting influences the associated financial expenses and the CO_2 emissions released into the atmosphere, some companies that are at the frontline of this sector, as well as some systems previously suggested to solve the same issue, were also analyzed, in order to understand, respectively, current and future market solutions, and the advantages and disadvantages that each proposed alternative offers.

Based on this analysis, an innovative lighting control system was suggested and described, and a prototype for regulating the brightness of a lamp was also built with a purpose to be applied it in a real environment.

All concepts implemented throughout this dissertation were always conducted by a basic principle [1]:

"*The aim of smart street lights is to save electric power, and the aim of street lights, is to keep public or street safety*"

Keywords: Communication protocols, Energy efficiency, IoT systems, LEDs, Public lighting, Smart Cities

Agradecimentos

O meu primeiro e mais forte agradecimento tem de ser dado ao Doutor Francisco Duarte, CEO da Pavnext, pela sua constante preocupação e disponibilidade para ajudar, fomentando o incentivo e o gosto pelo trabalho. O meu sincero desejo é que alcance o sucesso que merece.

Um obrigado também ao meu orientador interno, Paulo Costa, pelas discussões sobre o trabalho que me permitiram direcionar o foco dos assuntos a abordar neste documento.

Agradeço também à vereadora da câmara municipal de Esposende, Alexandra Roeger, pela partilha de informações alusivas à instalação de luminárias LED na cidade.

Os meus agradecimentos em relação a algumas pessoas, têm de ser referentes às contribuições prestadas ao longo de todo o curso, e não apenas às que dizem respeito à realização desta dissertação.

Aos meus amigos Carlos Barros e Daniel Baptista, por toda a ajuda que me foram fornecendo ao longo destes últimos cinco anos, a qual, posso hoje admitir, se revelou fundamental para a conclusão do curso.

À minha namorada, pela paciência, pela ajuda e pela amizade partilhada.

À minha família, pelo apoio incondicional revelado em todas as horas. Mãe, pai e irmã, um obrigado especial pelo esforço final partilhado comigo, para que esta dissertação corresse da melhor maneira possível. Nunca esqueci e nunca esquecerei.

Obrigado,

Alexandre Oliveira

"The only thing I knew how to do was to keep on keeping on"

- Bob Dylan

Conteúdo

1 Introdução **1**
1.1 Enquadramento e Motivação . . . 1
1.2 Objetivos e estrutura da Dissertação . . . 2

2 Visão geral do panorama da iluminação pública **3**
2.1 Contexto atual . . . 3
2.2 Luminária . . . 4
2.2.1 Componentes de uma luminária . . . 4
2.2.2 Eficiência luminosa, eficiência da luminária e eficácia da luminária . . . 5
2.3 Apoios de iluminação . . . 6
2.4 Lâmpadas . . . 6
2.4.1 Lâmpadas convencionais . . . 8
2.4.2 Integração de LEDs . . . 8
2.5 Gestão da iluminação . . . 12
2.5.1 Regulação do fluxo luminoso . . . 12
2.5.2 Sistemas de controlo e gestão . . . 12
2.5.3 Telegestão . . . 13
2.6 *Smart Cities* . . . 15

3 Tecnologias de comunicação **19**
3.1 Redes de comunicação e Especificação geográfica . . . 19
3.2 Topologias de rede . . . 20
3.3 Modos de interação . . . 22
3.4 Transmissão de dados . . . 23
3.5 Mecanismos de acesso ao meio . . . 24
3.6 *Trigger* de envio por tempo ou por eventos . . . 26
3.7 Protocolo de comunicação . . . 27
3.8 Modelo OSI . . . 27
3.9 Consumo de energia . . . 29
3.10 Modulação de sinais digitais . . . 30
3.11 Comunicações físicas e *wireless* . . . 31
3.11.1 Comunicações cabladas . . . 32
3.11.2 Comunicações *wireless* . . . 35

4 Estado da arte de sistemas e soluções atuais de gestão da IP **41**
4.1 Análise de sistemas propostos . . . 41
4.1.1 Sistema de geolocalização para gestão da IP . . . 42
4.1.2 Sistema de deteção de presença para a gestão da IP . . . 43

4.1.3 Sistema de identificação da distância para a gestão da IP 45
4.2 Análise de mercado 46
4.2.1 Siemens 46
4.2.2 Novalume/Lumintell 47
4.2.3 Lumenia 48
4.2.4 Philips 48
4.2.5 Tvilight 50
4.2.6 Síntese da estrutura de um sistema inteligente para IP 51

5 Estudo teórico sobre o controlo da iluminação pública 53
5.1 Caraterização do estudo 54
5.2 Cenários A e B - Mudança para lâmpadas LED 54
5.3 Cenário C - Introdução de sensores de luminosidade 56
5.4 Cenário D - Introdução de sensores de presença 56
5.5 Cenário E - Diferentes horários de presença 57
5.6 Cenário F - Diferentes horários de presença e de luminosidade 59
5.7 Contribuição do sistema Pavnext 59
5.8 Visão geral dos resultados 60
5.9 Análise de sensibilidade 62

6 Análise do Sistema 65
6.1 Estabelecimento de requisitos 65
6.1.1 Requisitos servidor de aplicação 65
6.1.2 Requisitos servidor de rede 66
6.1.3 Requisitos *power box* 67
6.1.4 Requisitos luminária 67
6.2 Conceito de sistema 68
6.2.1 Mecanismo para desligar/reduzir a intensidade da lâmpada 71
6.2.2 Expansão do sistema para inclusão de controlo por deteção de peões . . . 72
6.2.3 Controlo da iluminação 72
6.2.4 Arquitetura do sistema 74
6.3 Aplicação do sistema em diferentes cenários 75
6.3.1 Caraterísticas comuns a ambos os cenários 75
6.3.2 1º Cenário 76
6.3.3 2º Cenário 78

7 Desenvolvimento do Sistema 81
7.1 Seleção do tipo de comunicação 81
7.2 Idealização do protótipo 82
7.3 Estudo de mercado 84
7.3.1 Módulos de comunicação LoRa 85
7.3.2 Módulos de comunicação ZigBee 86
7.4 Construção do protótipo 88
7.4.1 *Hardware* 88
7.4.2 *Software* 91
7.5 Testes realizados e resultados obtidos 94
7.5.1 Testes com controlo de iluminação através de 5 LEDs 94
7.5.2 Testes com controlo de iluminação através de projetores LED 97

8 Conclusões **99**
8.1 Trabalho Futuro 100

A Estrutura dos programas de computador desenvolvidos referentes ao estudo dos cenários **101**
A.1 Cenários D e E 102
A.2 Cenário F 103
A.3 Função tempoOFF 104

B *Hardware* relativo ao protótipo implementado **105**
B.1 Esquemático nó recetor LoRa 106
B.2 Esquemático nó recetor ZigBee 107
B.3 Esquemático nó emissor (LoRa e ZigBee) 108
B.4 Nó recetor LoRa - Protótipo real 109
B.5 Nó recetor ZigBee - Protótipo real 109
B.6 Nó emissor LoRa e ZigBee - Protótipo real 110

C *Software* relativo ao protótipo implementado **111**
C.1 Nó emissor LoRa e ZigBee 112
C.1.1 Função DelayMicroSeconds(uint32_t delay_val) 112
C.1.2 Função distanceInCentimeters(void) 113
C.1.3 Função verifyLux(int lum, uint8_t zigbeePacket, uint8_t loraPacket) . . . 114
C.1.4 Função sendLux(int trigger) 115
C.1.5 Função sendMax(int trig) 116
C.1.6 Função stopMax() 117
C.1.7 Função main(void) - Parte 1 118
C.1.8 Função main(void) - Parte 2 119
C.2 Nó recetor LoRa 120
C.2.1 Função LoRaReceive() 120
C.2.2 Função iluminacao(int stateValue, int prevStateValue) 121
C.2.3 Função setup() - LoRa 122
C.3 Nó recetor ZigBee 123
C.3.1 Função ZigBeeReceive(bool mov) 123
C.3.2 Função analisaDados(int num, int data) 124
C.3.3 Função setup() - ZigBee 125

D Imagens dos diferentes testes realizados **127**
D.1 Testes executados nos escritórios Pavnext 128
D.2 Testes executados em ambiente real 129
D.2.1 Nó emissor LoRa e ZigBee 129
D.2.2 Nós recetores LoRa e ZigBee 130
D.2.3 Visão geral da experiência 131

Referências **133**

Lista de Figuras

2.1 Estrutura luminária tradicional 5
2.2 Percentagens de fontes luminosas em Portugal 7
2.3 Crescimento do número de fontes luminosas LED na IP ao longo dos anos 7
2.4 Estrutura luminária LED 9
2.5 Adesão estimada da tecnologia LED no mercado da iluminação entre 2010 e 2020 11
2.6 Sistema de telegestão 14
2.7 *Smart City* 15
2.8 Poste de iluminação inteligente 16

3.1 Topologias de rede 20
3.2 Técnicas de multiplexagem 24
3.3 *Trigger* de transmissão 27
3.4 Modelo OSI 28
3.5 Modulação Digital 31
3.6 UART 32
3.7 SPI 33
3.8 Modos de configuração 34
3.9 I^2C 34
3.10 Topologias e configurações ZigBee 37
3.11 Arquitetura LoRa 39

4.1 Funcionamento da estratégia apresentada 43
4.2 Componentes do sistema abordado 44
4.3 Ilustração do funcionamento do TALiSMaN 45
4.4 Arquitetura de comunicações baseada em cabines 46
4.5 Luminárias Lumintell 47
4.6 Kit conector Lumintell 47
4.7 Luminárias Lumenia 48
4.8 Formas de conexão baseadas em soluções CityTouch 49
4.9 Formas de conexão com cabine 49
4.10 Arquitetura das redes Tvilight 50

5.1 Maqueta do local de estudo 54

6.1 System Breakdown Structure 68
6.2 Diagrama de estados de controlo da iluminação 73
6.3 Arquitetura do sistema 74
6.4 Legenda sensores 74
6.5 1º Cenário 77

6.6 2º Cenário 78

7.1 Esquema do protótipo 83
7.2 Configuração XBee emissor 89
7.3 Configuração XBee recetor 89
7.4 Controlo da iluminação através de 5 LEDs 90
7.5 Controlo da iluminação através de um projetor LED 90
7.6 Diagrama de estados de controlo da iluminação - Protótipo 92
7.7 Legenda diagrama de estados - Protótipo 92
7.8 Formato de pacote de dados ZigBee em modo API 94

A.1 Fluxogramas dos códigos correspondentes aos cenários D e E 102
A.2 Fluxograma do código correspondentes ao cenário F 103
A.3 Função utilizada nos cenários D, E e F 104

B.1 Esquemático nó recetor LoRa 106
B.2 Esquemático nó recetor ZigBee 107
B.3 Esquemático nó emissor (LoRa e ZigBee) 108
B.4 Nó recetor LoRa - Protótipo real 109
B.5 Nó recetor ZigBee - Protótipo real 109
B.6 Nó emissor LoRa e ZigBee - Protótipo real 110

C.1 Função DelayMicroSeconds(uint32_t delay_val) 112
C.2 Função distanceInCentimeters(void) 113
C.3 Função verifyLux(int lum, uint8_t zigbeePacket, uint8_t loraPacket) 114
C.4 Função sendLux(int trigger) 115
C.5 Função sendMax(int trig) 116
C.6 Função stopMax() 117
C.7 Função main(void) - Parte 1 118
C.8 Função main(void) - Parte 2 119
C.9 Função LoRaReceive() 120
C.10 Função iluminacao(int stateValue, int prevStateValue) 121
C.11 Função setup() - LoRa 122
C.12 Função ZigBeeReceive(bool mov) 123
C.13 Função analisaDados(int num, int data) 124
C.14 Função setup() - ZigBee 125

D.1 Testes com os projetores de 12 V 128
D.2 Testes com os 5 LEDs - Nó emissor 129
D.3 Testes com os 5 LEDs - Nós recetores 130
D.4 Visão geral da experiência 131

Lista de Tabelas

2.1 Comparação entre fontes luminosas 10

3.1 Vantagens e Desvantagens de cada topologia 21
3.2 Vantagens e Desvantagens do meio de transmissão 32

5.1 Relação entre a potência das lâmpadas e a poupança energética 55
5.2 Horários com diferentes percentagens de emissão de luz 56
5.3 Variáveis impostas no cenário D 57
5.4 Horários com diferentes percentagens de emissão de luz - Cenário C 58
5.5 Horários com diferentes percentagens de emissão de luz - Cenário F 59
5.6 Perfil dos cenários 60
5.7 Visão geral dos resultados de poupança energética 60
5.8 Visão geral dos resultados referentes às contribuições dos dispositivos Pavnext . . 61
5.9 Influência da potência das lâmpadas na contribuição financeira 63
5.10 Gama de tempos das lâmpadas ligadas aquando da presença de veículos/peões . . 63
5.11 Influência dos tempos de presença de veículos/peões na poupança 63
5.12 Influência das taxas de emissão de luz na ausência de veículos/peões 64

6.1 Requisitos funcionais servidor de aplicação 66
6.2 Requisitos não funcionais servidor de aplicação 66
6.3 Requisitos funcionais servidor de rede 66
6.4 Requisitos não funcionais servidor de rede 67
6.5 Requisitos funcionais *power box* 67
6.6 Requisitos não funcionais *power box* 67
6.7 Requisitos funcionais luminária 68
6.8 Requisitos não funcionais luminária 68
6.9 Síntese das principais caraterísticas do sistema 75

7.1 ZigBee vs LoRa 82
7.2 Comparação entre módulos de comunicação LoRa 85
7.3 Comparação entre módulos de comunicação ZigBee 87
7.4 Protocolo de comunicação padrão 93
7.5 Testes e resultados do protótipo com controlo de iluminação através de 5 LEDs . 96
7.6 Testes e resultados do protótipo com controlo de iluminação através de projetores LED 97

Abreviaturas

ACK	Acknowledgement
ADC	Analog To Digital Converter
API	Application Programming Interface
ASK	Amplitude Shift Keying
BFSK	Binary Frequency Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BW	Bandwidth
CC	Corrente Contínua
CCU	Clock Control Unit
CFL	Lâmpadas Fluorescentes Compactas
CIE	Commission Internationale de L'éclairage
CO_2	Dióxido de Carbono
CL	Controlador Luminária
CPHA	Clock Phase
CPOL	Clock Polarity
CR	Coding Rate
CS	Controlador Segmento
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSS	Cascading Style Sheets
CSS	Chirp Spread Spectrum
CTS	Clear to send
DAVE	Digital Application Virtual Engineer
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DNS	Domain Name System
EDP	Energias de Portugal
EUA	Estados Unidos da América
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FSK	Frequency Shift Keying
FTP	File Transfer Protocol
FTTC	Fiber-to-the-Curb/Cabinet
FTTH	Fiber-to-the-Home
ID	Identity
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IP	Iluminação Pública

GCC	GNU Compiler Collection
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
HAN	Home Area Network
HTML	HyperText Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
LAN	Local Area Network
LDR	Light Dependent Resistor
LED	Light Emitting Diode
LLC	Logical Link Control
LPWAN	Low Power Wide Area Network
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan area network
MFSK	Multiple Frequency Shift Keying
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnection
PAN	Personal Area Network
PCB	Printed Circuit Board
PHP	PHP: Hypertext Preprocessor
PLC	Power Line Communication
PSK	Phase Shift Keying
PT	Posto de Transformação
PWM	Pulse-width modulation
RF	Radio Frequency
RTC	Real Time Clock
RTS	Request to Send
SBS	System Breakdown Structure
SCEWC	Smart City Expo World Congress
SCL	Serial Clock Line
SCLK	Serial Clock
SDA	Serial Data Line
SF	Spreading Factor
SGC	Sistema de Gestão Central
SMA	SubMiniature version A
SS	Slave Select
SPI	Serial Peripheral Interface
I^2C	Inter-Integrated Circuit
TALiSMaN	Traffic-Aware Lighting Scheme Management Network
TCP	Transmission Control Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TWh	Terawatt-hour

UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
VSAP	Vapor de Sódio de Alta Pressão
VSBP	Vapor de Sódio de Baixa Pressão
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Wide Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZC	ZigBee Coordinator
ZED	ZigBee End Device
ZR	ZigBee Router
$_3$GPP	3rd Generation Partnership Project

Símbolos

%	Percentagem
GHz	Giga-Hertz
MHz	Mega-Hertz
kHz	Quilo-Hertz
km	Quilómetro
m	Metro
mm	Milímetro
h	Hora
min	Minuto
s	Segundo
ms	Milissegundo
μ	Microsegundo
t	Tempo
km/h	Quilómetro por hora
m/s	Metro por segundo
Mbits/s	Megabits por segundo
kbits/s	Quilobits por segundo
bits/s	Bits por segundo
mW	Miliwatt
W	Watt
kWh	Quilowatt-hora
kΩ	Quiloohm
Ω	Ohm
lm	Lúmen
G	Geração
dBm	Decibel Miliwatt
Tx	Transmissor
V	Volt
mA	Miliampère

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A escrita desta dissertação resulta do culminar de vários meses de trabalho nas instalações da Pavnext, durante os quais se desenvolveu um sistema prático e funcional de gestão da iluminação pública, adotando os princípios base oferecidos pelos dispositivos da empresa.

Com vista à procura de soluções inovadoras, que possam contribuir para uma maior sustentabilidade ambiental e económica, assim como para uma melhor qualidade da vida humana, surgiu a Pavnext. A Pavnext é uma *Startup* que aposta numa alternativa à forma como atualmente se olha para a segurança rodoviária. O conceito da empresa consiste na implementação de um dispositivo (designado por NEXT-Road) na superfície de um pavimento de estrada, que garanta a diminuição da velocidade dos veículos que por ali passem. Esta desaceleração, é realizada sem o auxilio humano e de forma não agressiva para os ocupantes do veículo, ao contrário do que acontece hoje em dia com as lombas. O mecanismo é instalado em zonas especificas, como junto a passadeiras, perto de escolas/hospitais ou em locais onde os veículos tendam a circular muito rápido. Durante a passagem do veículo pelo pavimento, o sistema recolhe energia cinética e converte-a, com elevada eficiência, em energia elétrica. Posteriormente, esta energia é transferida para uma cabine de rua (*Power box*), que a armazena, de forma a que possa ser utilizada para diferentes finalidades, nomeadamente para a iluminação de estradas e passadeiras, para o carregamento de veículos elétricos ou ainda para fornecimento de energia para alimentar semáforos. Além de uma evidente melhoria da segurança nas estradas, a proposta da Pavnext, permite ainda estabelecer uma monitorização, em tempo real, do tráfego rodoviário e dos consumos energéticos, de modo a que possa ser realizada uma gestão que permita otimizar parâmetros associados aos custos, à eficiência energética e ainda a indicadores ambientais. A somar a todas as vantagens referidas, a capacidade de funcionar através de um modo inteligente, assenta numa perspectiva de vasta aplicabilidade num futuro próximo, uma vez que é visível a facilidade de integração da proposta da Pavnext, em sistemas de *Internet of Things* e *Smart Cities*.

Segundo a *Startup*, o seu objetivo primordial consiste em "tornar as cidades mais seguras, inteligentes e sustentáveis através das nossas inovações" [2]. Nesse sentido, a ideia de fazer parte

de um projeto inovador, que poderá, mais cedo ou mais tarde, revolucionar o dia a dia de cada cidadão enquanto sociedade, foi motivação mais do que suficiente para abordar e explorar esta temática.

1.2 Objetivos e estrutura da Dissertação

A partir das mais valias oferecidas pela *Startup*, o objetivo base desta dissertação passa por criar um sistema inteligente de gestão da iluminação pública, apoiado na capacidade de recolha de dados e energia por parte dos dispositivos Pavnext, funcionando por isso como uma fonte de *Energy Harvesting*. Todavia, de forma a que o sistema proposto seja robusto para ser aplicado em larga escala, o mesmo deve assegurar que o seu funcionamento seja viável tanto em zonas onde os princípios da Pavnext são empregues, como em locais onde o pavimento NEXT-Road não é instalado. De forma a cimentar o sistema proposto neste documento, um outro objetivo desta tese, consiste em descrever minuciosamente a implementação de um protótipo que se insira nos conceitos do sistema sugerido. Na prática, esta dissertação oferece a oportunidade de imaginar, desenvolver e testar, uma solução real e visível sobre um problema que se encontra facilmente identificado e que, direta ou indiretamente, afeta o bem estar dos cidadãos e o futuro do planeta.

A dissertação é segmentada em oito capítulos, tendo início em 1, onde é feita a proposta da tese e a estruturação do documento. Os capítulos 2 e 3 promovem, respetivamente, uma reflexão pormenorizada sobre o setor da iluminação pública, e uma pesquisa sobre as diferentes vertentes envolvidas na área das tecnologias de comunicação. No capítulo 4, que corresponde ao estado de arte, são analisados vários exemplos de sistemas já apresentados, criados para tentar solucionar o mesmo problema em questão. Adicionalmente, este capítulo serve ainda para fixar as várias soluções atuais de mercado, oferecidas por diferentes empresas. Em 5, procurou-se definir um estudo referente à relação entre a forma como a energia gasta na iluminação pública, pode ser consumida tendo em conta o tráfego urbano e diferentes condições ambientais. Neste estudo, foi ainda observado o impacto que o sistema Pavnext apresenta em parâmetros como os custos financeiros envolvidos e os consumos energéticos. A partir de toda a informação recolhida e assimilada através dos capítulos anteriores, foi possível sugerir e definir um sistema inteligente de gestão da iluminação (capítulo 6) e construir e caraterizar um protótipo de desenvolvimento capaz de lidar com as funcionalidade impostas pelo sistema (capítulo 7). Todas as conclusões e resultados, assim como as propostas de trabalho futuro são apresentadas no capítulo 8.

Capítulo 2

Visão geral do panorama da iluminação pública

2.1 Contexto atual

A sustentabilidade da nossa sociedade tal como a conhecemos depende, entre outros fatores, de uma relação estável entre energia elétrica produzida e consumida. Atualmente tem-se observado uma expansão demográfica que como consequência conduz a um aumento do consumo energético, criando um desfasamento entre a energia elétrica utilizada relativamente à produzida. Sendo que é nas cidades que vive mais de metade da população mundial, estas são também as responsáveis pelo consumo de 60% a 80% da eletricidade.

> "*As cidades têm uma enorme pegada ecológica, consumindo mais de dois terços da energia mundial, sendo responsáveis por cerca de 70% das emissões globais de* CO_2"
>
> — António Guterres, Secretário-geral da ONU, 2019

A estes problemas encontram-se associadas soluções relacionadas com a produção de eletricidade (através do aproveitamento de recursos naturais como fontes de energia) e soluções que permitam diminuir a quantidade e os gastos de energia não aproveitada (sendo estas últimas as que este relatório pretende dar ênfase).

Dentro do setor da iluminação, é na parcela da iluminação pública que se encontram os maiores desperdícios de energia útil, sendo que em certas cidades que ainda recorrem a soluções antigas e ineficientes, esta atividade pode ser responsável por 40% de toda a energia consumida [3]. O número de luminárias nas ruas tem crescido de ano para ano, existindo à data de hoje aproximadamente 303 milhões de fontes de iluminação pública [4], mas estima-se que em 2025, esse valor cresça para 350 milhões [5]. Na Europa, o número de luminárias encontra-se entre os 60 e os 90 milhões, dos quais 75% têm mais de 25 anos [6], consumindo mais de 35 TWh de energia anualmente [7]. Em Portugal, segundo os dados fornecidos pela EDP Distribuição, com mais de 3 milhões de fontes de luz, a iluminação pública representa 2.8% de toda a energia utilizada em território nacional (equivalente a um consumo de 1.3 TWh) [8]. Numa noticia publicada em 2017 [9]

pela EURACTIV (rede de jornalistas independentes especializados em políticas da UE), afirmou-se que no ano de 2015, no conjunto das várias cidades europeias se gastou cerca de 7.6 biliões de euros em energia para iluminação pública. O valor desembolsado para este setor poderia chegar a representar 50% do orçamento de cada município. Contudo, a mesma noticia afirma ainda que em média, destas faturas poderiam ser poupados aproximadamente 70% dos gastos se as cidades estivessem dispostas a investir em melhores soluções e tecnologias de iluminação. Seguindo essa ideia, a comissão europeia anunciou uma ajuda de procura de financiamento para que até 2025 se instalem 10 milhões de luminárias de rua com tecnologia eficiente.

Como são as cidades as maiores responsáveis pelas alterações climáticas que se têm verificado, é também da responsabilidade das cidades encontrar soluções que combatam estes problemas. No âmbito do setor da iluminação, a solução a curto prazo e que já tem sido implementada, passa por substituir todas as lâmpadas existentes nas luminárias de rua por lâmpadas LED. A médio e longo prazo, a solução a implementar terá que integrar os conceitos de eficiência energética e redução de gases poluentes com os avanços tecnológicos associados às *Smart Cities*. Este capítulo visa perceber o impacto da implementação deste tipo de soluções, abordando em detalhe os mais variados conceitos ligados ao setor da IP (Iluminação Pública). Luminária ou poste de iluminação são termos muitas vezes utilizados de forma corrente para apelidar a definição de iluminação pública, contudo não têm o mesmo significado técnico. IP é um conjunto de tecnologias, nomeadamente, luminárias, acessórios auxiliares, lâmpadas, apoios de iluminação e sistemas de controlo, formando um modelo de iluminação para as cidades durante a noite.

2.2 Luminária

A luminária é um dispositivo fundamental para uma correta e eficiente distribuição da iluminação. Se por um lado, a lâmpada apenas apresenta a capacidade de emitir luz, cabe à luminária a responsabilidade de filtrá-la, modificá-la e distribui-la de forma adequada à sua utilização, garantindo o maior rendimento possível e a satisfação das necessidades da via pública. Adicionalmente, a luminária tem ainda como função proteger os componentes que a constituem, evitando possíveis danos provenientes de situações externas (vento, chuva, etc).

2.2.1 Componentes de uma luminária

Na sua constituição, uma luminária apresenta um conjunto de dispositivos óticos, mecânicos e elétricos, dos quais alguns se encontram devidamente retratados na figura 2.1. Relativamente aos elementos óticos destacam-se os **refletores** (direccionam a luz para um local especifico), os **refratores** (apresentam a mesma função dos refletores mas sob principios de refração) e os **difusores** (diminuem a intensidade da luz, aumentando o conforto visual). Da parte mecânica, salienta-se o **suporte das lâmpadas** (garantem a estabilidade das mesmas), o **orgão de fixação da luminária** (fixa a luminária ao apoio de iluminação) e o **corpo da luminária** (que, podendo também se designar por corpo da armadura ou carcaça, tem a função de garantir a proteção dos dispositivos no seu interior, podendo apresentar diferentes formatos e caraterística consoante os mesmos).

Por último, associado à secção elétrica tem-se a **lâmpada** e o **equipamento auxiliar**. Tanto as lâmpadas de descarga, como as LED, não podem ser diretamente ligadas à rede, servindo o equipamento auxiliar como meio intermediário. No caso das luminárias de descarga, o equipamento é composto por um **condensador** (responsável pela correção do fator de potência da luminária), um **ignitor** (gera impulsos de tensão que permitem o início da descarga da lâmpada) e um **balastro** (cuja função passa por limitar a corrente para garantir o efeito pretendido da lâmpada) [10]. No que diz respeito às luminárias LED, os 3 dispositivos mencionados anteriormente são substituídos por **drivers** [11]. Os drivers são aparelhos de controlo que permitem, por um lado converter a corrente alternada em contínua (os LEDs funcionam a CC) e por outro lado, garantir o controlo da tensão, de forma a que a corrente que atravessa os LEDs seja tipicamente constante. A corrente ao não variar, promove a estabilidade do fluxo luminoso e da temperatura da luminária e previne estragos na constituição dos LEDs. Existem alguns métodos de controlo da corrente, dos quais se destaca, a comutação por PWM [12], que para além de assegurar um valor de corrente preciso, permite o seu controlo através da variação do *duty cycle*, que se traduz na capacidade de regular o fluxo luminoso emitido pela luminária.

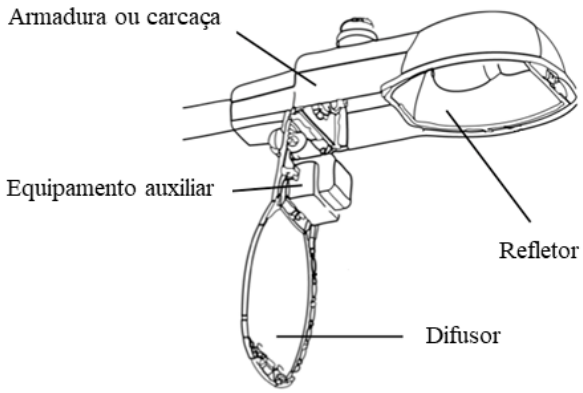


Figura 2.1: Estrutura luminária tradicional
Fonte: Adaptado de *Thomas & Betts corporation* [13]

Na área da iluminação pública existem inúmeras combinações entre armaduras e correspondentes dispositivos no seu interior, que variam tanto a nível estético como a nível prático, atendendo a diferentes propósitos. Há que ter em conta diferentes fatores no momento de escolha de luminárias, nomeadamente, no **custo**, **facilidade de limpeza e substituição de lâmpadas**, **dimensões e peso**, **resistência**, **potência das lâmpadas**, entre outros.

2.2.2 Eficiência luminosa, eficiência da luminária e eficácia da luminária

Eficiência luminosa, eficiência da luminária e eficácia da luminária são expressões que podem parecer ter o mesmo significado, no entanto é importante destacar as suas diferenças.

Antes de mais, é conveniente definir o conceito de fluxo luminoso, como a quantidade de luz emitida por uma fonte, em todas as direções. À relação entre a potência absorvida pela fonte (lâmpada) e o fluxo luminoso total emitido pela mesma, dá-se o nome de **eficiência luminosa**.

Relativamente à luminária, a sua **eficiência** corresponde ao quociente entre o fluxo luminoso emitido pela lâmpada e o fluxo luminoso emitido pela própria luminária. Para uma boa iluminação é essencial que a luminária seja eficiente, contudo de pouco valem bons resultados neste parâmetro se, por exemplo, a luminária não incidir na direção correta para uma iluminação em conformidade com os principios de circulação segura e confortável na via pública. Por conseguinte, atribui-se o nome de **eficácia da luminária** à capacidade da mesma em satisfazer certos critérios que assegurem uma iluminação que corresponda com os propósitos propostos. Habitualmente são instalados conjuntos de luminárias numa zona e não apenas uma só, logo, a eficácia de uma luminária está diretamente englobada na eficácia do conjunto das mesmas. A instalação de várias luminárias é um processo complexo que obriga a um estudo prévio sobre as condições do local (existência ou não de fontes externas de luz, susceptibilidade a acidentes rodoviários, visibilidade dos condutores, zona movimentada/calma). As informações recolhidas corresponderão às necessidades pretendidas, servindo de base para a definição de variáveis como o número de luminárias precisas, o fluxo luminoso e o alcance que cada uma deverá ter, a direção e o ângulo de incidência de luz, etc.

2.3 Apoios de iluminação

O apoio de iluminação funciona como suporte da luminária podendo ser de três tipos diferentes: Postes de iluminação, Cabos de suspensão ou Braços em fachadas de edifícios. Apesar de os postes de iluminação serem claramente o tipo de apoio mais comum, há que ter em conta alguns fatores quando se pretende escolher uma forma de suporte para a luminária. A altura a que a luminária está do chão pode influenciar a percentagem de atos de vandalismo, que por sua vez terá impacto nos custos de manutenção. Adicionalmente, é importante analisar as condições físicas do local para perceber a viabilidade de instalação do apoio, assim como deve ser feita uma otimização da distribuição luminosa resultante da instalação das luminárias.

2.4 Lâmpadas

A lâmpada destaca-se como a fonte de luz artificial mais utilizada em todo o mundo. Existe uma larga diversidade de tipos de lâmpadas, das quais a grande maioria são designadas de lâmpadas convencionais, que se diferenciam entre lâmpadas incandescentes, descarga e indução. Em sentido oposto, tem-se as lâmpadas LED, que se definem como sendo semicondutores. Apesar do mercado apresentar uma panóplia de lâmpadas ao dispor, nem todas são utilizadas na IP. Em 2016, a EDP Distribuição fez uma recolha de informações [10] e apresentou as percentagens de cada lâmpada existente em luminárias de rua (gráfico da figura 2.2), da qual se destacava a ampla margem de uso das lâmpadas de vapor de sódio (VSAP), relativamente a qualquer outra. A respeito do gráfico, resta assinalar que dentro da parcela "Outros", estão incluídas as lâmpadas de iodetos metálicos, fluorescentes e de indução (enunciadas pela ordem das que existem em maior número para as que existem em menor número).

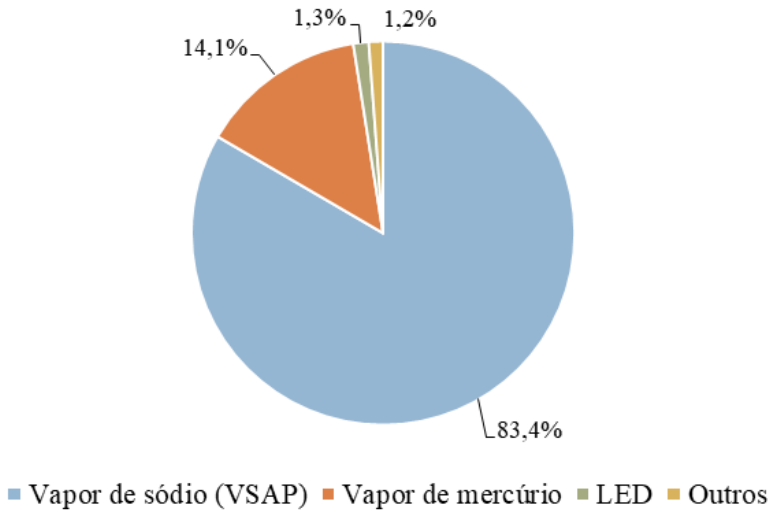


Figura 2.2: Percentagens de fontes luminosas em Portugal
Fonte: Adaptado do manual de IP, EDP [10]

À data de hoje, as percentagens do gráfico da figura 2.2 já não são as mesmas. A cada ano que passa são substituídas lâmpadas convencionais ou são instaladas novas luminárias LED, marcando passo no caminho para a obtenção de uma iluminação pública mais eficiente. Dados de 2017 [14], 2018 [8] e 2019 [15], indicam que com os investimentos efetuados pela EDP Distribuição, a percentagem de fontes de luz LED tem aumentado em Portugal, em média, cerca de 6% ao ano (valores exibidos no gráfico da figura 2.3), evolução essa em Portugal que é representativa de uma evolução semelhante no resto do mundo. A EDP afirma ainda que esse crescimento manter-se-à nos próximos anos numa taxa de crescimento entre 6 a 8% [8].

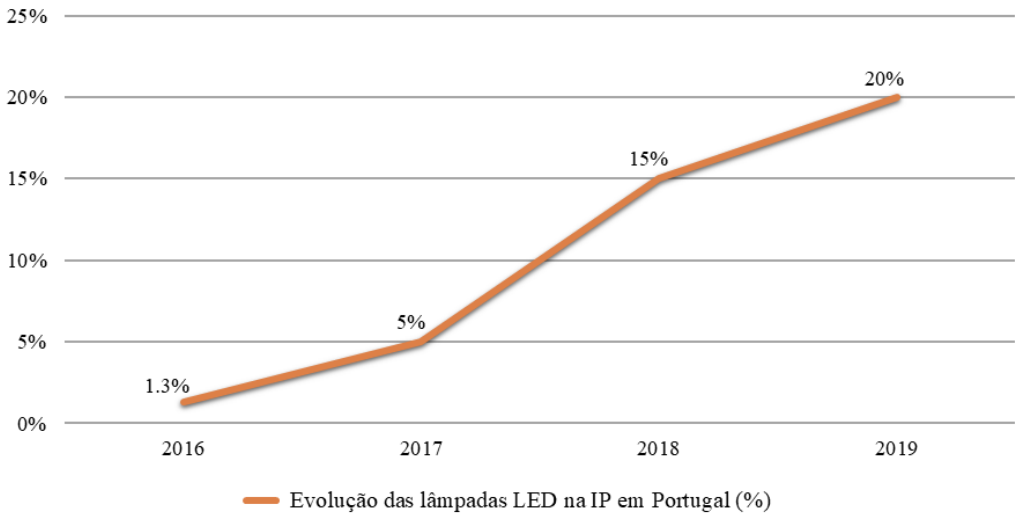


Figura 2.3: Crescimento do número de fontes luminosas LED na IP ao longo dos anos
Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.1 Lâmpadas convencionais

As **lâmpadas incandescentes** foram o primeiro tipo de lâmpadas criadas, das quais fazem parte as de **halogéneo**. O fenómeno de incandescência baseia-se na passagem de corrente elétrica por um filamento, que ao aquecer, esse aquecimento se traduz na emissão de luz. A eficiência extremamente baixa das lâmpadas de halogéneo (na ordem dos 5%), levou a Comissão Europeia a proibir a sua comercialização desde 2018 [16]. Segundo a instituição que serve os interesses da União Europeia, os seus cálculos [17] previram que esta medida garantisse uma poupança de 9.4 TWh de energia (equivalente a um quinto do consumo energético em Portugal) em 2020, correspondente a uma redução de 3.4 milhões de toneladas de gases CO_2 emitidos. Com esta medida, a instituição política tomou um passo em frente no combate às alterações climáticas.

Dentro do tipo de **lâmpadas de descarga** podem ser encontradas, entre outras, as lâmpadas fluorescentes compactas (CFL), vapor de sódio de alta (VSAP) e de baixa pressão (VSBP), vapor de mercúrio e iodetos metálicos. O principio de descarga consiste na emissão de luz aquando da passagem de corrente elétrica por gases ou vapores.

Apesar das **lâmpadas de vapor de mercúrio** ainda serem facilmente encontradas em luminárias de rua, este tipo de lâmpadas também se encontra em fase de extinção no mercado. Ao apresentar mercúrio na sua constituição e sendo do conhecimento geral todos os malefícios deste metal, tanto para a saúde humana, como para o ambiente, a partir do ano corrente (2020), a fabricação, importação e exportação de produtos com mercúrio passarão a ser proibidas [18]. Na mesma linha de raciocínio, as **lâmpadas fluorescentes** (que também contêm mercúrio no seu interior) deverão passar a ser consideradas pela Comissão Europeia como obsoletas [19] a partir de 2021 (tal como foram as de halogéneo).

Ao adicionar iodetos metálicos às lâmpadas de mercúrio, surgiram as **lâmpadas de iodetos metálicos**. Essa adição garantiu uma maior eficiência luminosa e uma cor esbranquiçada. Estas lâmpadas dispõem de um tempo de vida reduzido e obrigam a um período de aquecimento para atingir o fluxo máximo de luz. Também as **VSAP** precisam de intervalo de tempo significativo para acenderem na totalidade. Estas últimas, sendo as que existem em maior número na IP, apresentam uma cor alaranjada/amarelada e algumas caraterísticas que as beneficiam relativamente às demais de descarga, como a sua eficiência e o facto de serem maioritariamente constituidos por sódio, em vez de mercúrio (apesar de também conterem). As **VSBP** não serão mencionadas por não serem utilizadas com o intuito de iluminar as cidades durante a noite.

Por último, as **lâmpadas de indução** são consideradas um aperfeiçoamento das lâmpadas fluorescentes, caraterizando-se por um rápido tempo de arranque e por um longo tempo de vida.

2.4.2 Integração de LEDs

Durante os cerca de 141 anos desde que Thomas Edison criou e comercializou a primeira lâmpada elétrica, vários tipos de lâmpadas foram usados de forma a iluminar os mais variados espaços públicos, contudo nenhuma delas revolucionou o mundo da iluminação como os **LEDs**.

Light Emitting Diode (LED) é, tal como o nome indica, um díodo semicondutor, ou seja, um dispositivo eletrónico que quando é percorrido por corrente elétrica, tem a capacidade de emitir luz. As lâmpadas LED têm sido particularmente colocadas nas habitações e interiores de edifícios de forma a substituir as convencionais, e apesar de também poderem ser aplicadas na iluminação pública com o mesmo propósito, o mais comum tem sido a implementação de luminárias desta tecnologia, que no seu interior contêm vários LEDs incorporados, tal como mostra a figura 2.4.

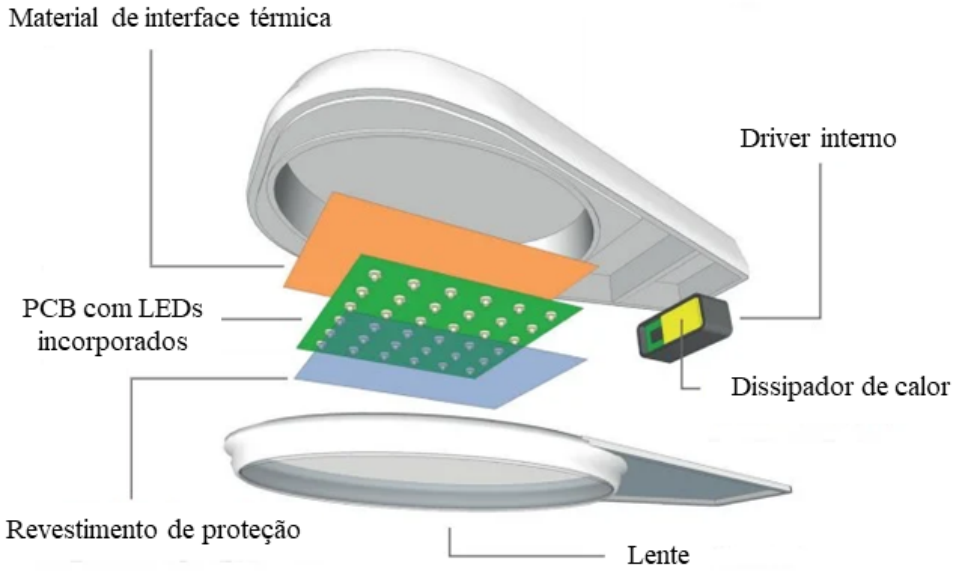


Figura 2.4: Estrutura luminária LED
Fonte: Adaptado de *Electrolube: The Solutions People* [20]

Estas fontes luminosas quando comparadas com as que eram utilizadas até então, não apresentam filamentos, nem usam o principio de descarga, sendo sinónimas de **eficiência**, **sustentabilidade**, **rapidez** e **baixa temperatura**.

As lâmpadas LED necessitam de consumir muito menos eletricidade para transmitir a mesma quantidade de luz que qualquer outra lâmpada, sendo por isso apresentadas como extremamente **eficientes**, chegando a poder representar uma poupança entre 50-70% de energia [6] (podendo o valor ser maior, dependendo de certos fatores). A EDP Distribuição estimou [15] que, em 2019, o setor da iluminação pública portuguesa ao ser constituído por 600 mil luminárias LED (20% de todas as fontes de luz), os ganhos de eficiência se traduziriam na poupança de 80.1 milhões de KWh de energia, na redução de 40.3 mil toneladas de gases emitidos para a atmosfera e na economia de 16 milhões de euros no conjunto dos 278 municípios em Portugal.

O tempo de vida das lâmpadas LED é também significativamente grande, podendo chegar a durar 12 anos, mais 10 anos que as de vapor de mercúrio e mais 8 do que as VSAP. Esta **sustentabilidade** é também representativa de menos custos de manutenção e de uma menor necessidade de obrigar trabalhadores a fazer troca de lâmpadas em locais difíceis e possivelmente pouco seguros. Os LED são recicláveis e na sua constituição não apresentam mercúrio, sendo por isso uma opção mais agradável para o meio ambiente e segura para o ser humano.

No que diz respeito ao tempo que as lâmpadas demoram a acender, também neste critério, os LEDs levam vantagem ao serem muito mais **rápidos**, podendo quase ser considerados instantâneos. Esta caraterística permite fazer uma regulação da luz eficiente e assim integrar esta tecnologia em sistemas de IP inteligentes.

As lâmpadas incandescentes tendem a **aquecer** muito, o que não acontece com as lâmpadas LED que ao não aquecerem, não têm tendência a atrair qualquer tipo de inseto (animais que podem transportar doenças).

Algumas das caraterísticas das lâmpadas LED não mencionadas são também de relevo quando o foco é o uso das mesmas em luminárias de rua. **Robustez**, **brilho** e **segurança** são vantagens a ter em conta.

As lâmpadas em questão apresentam elevada **resistência**, não se partindo com facilidade, sendo à prova de água e funcionando em qualquer situação climatérica.

A luz emitida por estas fontes apresenta geralmente apenas uma direção, emitindo **mais brilho** e permitindo a peões e motoristas distinguir diferentes objetos com mais clareza. No entanto, este brilho, não tende a pôr em causa a visão dos condutores na estrada.

Um dos elementos chave para a felicidade dos cidadãos de qualquer cidade prende-se com a **segurança**. Estudos feitos na cidade de Nova York [21] (EUA) demonstraram que a instalação de postes de iluminação LED pelas ruas da cidade apresenta uma relação com a diminuição da criminalidade noturna, cuja redução foi de 39%. Em Granada [22] (Espanha), a partir de um estudo realizado, onde se avaliou o bem-estar de cidadãos nas ruas à noite, concluiu-se que estes se sentiam menos receosos e mais confortáveis na presença de luz emitida por lâmpadas LED.

A tabela 2.1 compara as diferentes fontes luminosas mencionadas neste relatório até ao momento, sobre diversos fatores como o tempo de vida, a eficiência luminosa e o tempo de arranque, evidenciando as claras vantagens dos LEDs.

Tabela 2.1: Comparação entre fontes luminosas

	Fontes de luz						
	Halogéneo	CFL	Vapor de mercúrio	VSAP	Iodetos metálicos	Indução	LED
Eficiência luminosa (lm/W)	20-25	50-70	40-60	80-150	65-110	60-85	75-160
Tempo de arranque (min)	Poucos segundos	3	4	5	5	Instantâneo	Instantâneo
Tempo de vida (*1000h)	2-4	6-15	10-24	18-32	8-16	60-100	+100

A substituição das lâmpadas convencionais por LEDs tem um custo. A curto prazo e especificamente para pessoas de classe média ou baixa, o preço da troca das lâmpadas pode ser visto como

um entrave, por ser demasiado caro. Em contrapartida, grandes instituições e governos veem o negócio do mercado LED como uma vantagem financeira com um retorno elevado a médio prazo. Não obstante, a tendência de crescimento do mercado desta tecnologia (como mostra o gráfico da figura 2.5) tem sido, e prevê-se que continue a ser, inversamente proporcional ao custo da mesma. Acompanhada de uma diminuição do preço dos LEDs, está também uma melhoria nas caraterísticas destes dispositivos eletrónicos. Numa entrevista ao jornal Público [14], Sérgio Silva, CEO do grupo Vigent, empresa de fabrico de postes de iluminação pública, afirmou que a tecnologia LED é atualmente utilizada em 90% dos casos de implementação ou substituição de luminárias, tanto em Portugal como noutros países europeus.

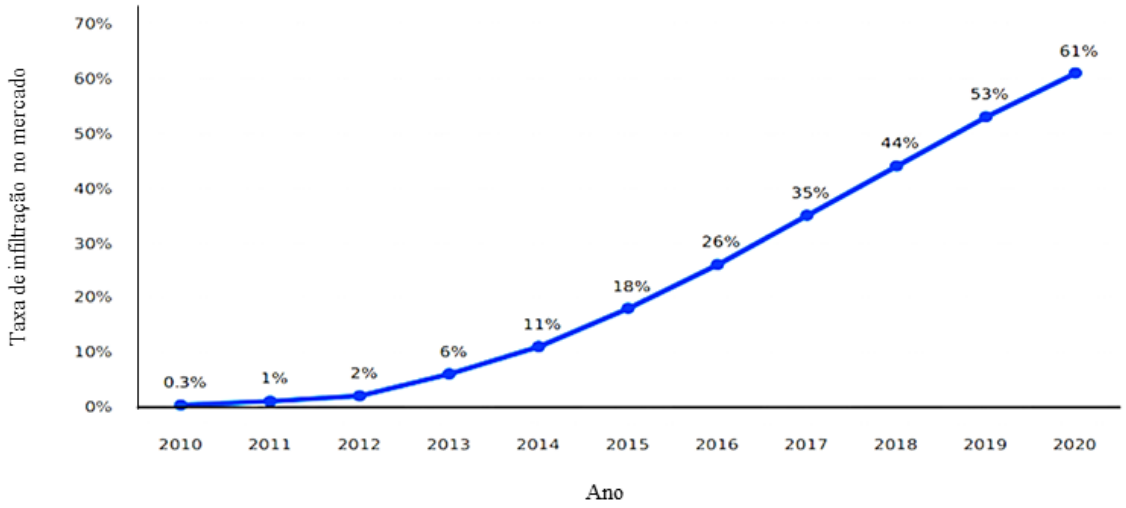


Figura 2.5: Adesão estimada da tecnologia LED no mercado da iluminação entre 2010 e 2020
Fonte: Adaptado de *Statista* [23]

Apesar de serem muitas as vantagens mencionadas relacionadas com o uso destas fontes luminosas, estas também apresentam, como qualquer dispositivo eletrónico, algumas desvantagens a ter em conta.

"O mundo está a ficar sem noite", palavras proferidas no seguimento de um estudo publicado na revista Science Advances [24], que avaliou a quantidade de radiação luminosa noturna à escala global. Segundo os dados recolhidos, desde 2012, a percentagem de luz artificial tem aumentado em 2% ao ano, aumento esse que tem acompanhado o crescimento da instalação de postes de iluminação LED. Se por um lado estas lâmpadas garantem tremendas melhorias em termos de eficiência energética, resultam também numa maior taxa de **poluição luminosa**. Demasiada exposição à luz durante a noite afeta tanto animais noturnos, como o próprio ser humano, através de perturbações no sono.

Adicionalmente, a iluminação por via de lâmpadas LED necessita de profissionais que saibam fazer uma boa gestão do local de instalação e do número de postes de iluminação instalados, de forma a evitar zonas com pouca ou demasiada luz e também evitar que a própria luz emitida não interfira negativamente na visão dos condutores (dado que são tendencialmente unidirecionais).

2.5 Gestão da iluminação

Como foi retratado anteriormente, a instalação de lâmpadas LED constitui uma poupança energética muito significativa. No entanto, apesar da excelente eficiência obtida associada às caraterística do dispositivo, a própria iluminação pode ser gerida de tal forma que se evitem desperdícios tanto energéticos, como financeiros. Essa gestão pode ser conseguida através da aplicação de sistemas distintos, que estarão por sua vez associados a diferentes percentagens de ganhos, facilidades de instalação e custos. É necessário realçar que esta gestão deve ser alcançada dentro de certos limites mínimos de segurança e iluminação, impostos pelas normas introduzidas pela CIE (Comissão Internacional de Iluminação) [10].

2.5.1 Regulação do fluxo luminoso

O fluxo luminoso emitido por cada lâmpada não é necessariamente igual àquele que corresponde às necessidades de iluminação existentes em cada local. Por esse motivo, existem mecanismos que permitem regular a potência fornecida à fonte de luz, de forma a que o fluxo luminoso seja ajustado. Esse controlo pode ser conseguido por meio de duas abordagens, podendo estas estar ou não, associadas a sistemas de controlo ou a telegestão. Por um lado, através da instalação de dispositivos em luminárias (Balastros no caso de lâmpadas convencionais e Drivers no caso de serem LED) que permitam uma gestão da tensão, corrente ou frequência de alimentação. Por outro lado, os reguladores de fluxo podem ser instalados "à cabeceira"(junto do PT) do circuito de IP, de forma a controlar simultaneamente várias luminárias. Ambas as abordagens garantem uma redução do consumo energético, sem pôr em causa a qualidade de iluminação.

No geral, o principio de controlo de fluxo pode ser aplicado em qualquer lâmpada de descarga, porém esse controlo não pode ser realizado em todas de forma semelhante. A regulação através da variação de tensão é o método mais usual neste tipo de lâmpadas, sendo que todas apresentam uma tensão mínima, responsável pelo funcionamento da mesma. Abaixo de 200 Volts, as lâmpadas de mercúrio não irão funcionar e o mesmo acontece com as lâmpadas de iodetos metálicos e VSAP, quanto a tensão é inferior a 183 Volts. Em sentido oposto, os LEDs permitem um controlo total do fluxo luminoso, que adicionalmente, pode ser obtido de forma muito mais simples e eficaz.

2.5.2 Sistemas de controlo e gestão

As lâmpadas sozinhas não são inteligentes ao ponto de compreenderem os momentos em que faz sentido estarem ligadas, desligadas ou a emitir menos/mais luz. Por esse motivo, existem sistemas de controlo que permitem gerir a iluminação tendo em conta diversos fatores externos.

Os sistemas mais simples de adotar correspondem aos de comutação ON/OFF, que controlam apenas o momento de ligar e desligar as luminárias, nomeadamente, **temporizadores** e **relógios astronómicos**.

Os temporizadores são utilizados com o intuito de programar a altura do dia em que se pretende ligar e desligar a iluminação pública. São um sistema básico mas ainda muito usado atualmente. Para além da comutação ON/OFF, os temporizadores permitem programar as luminárias para diminuir a percentagem de luz a emitir após um certo número de horas (regulação de fluxo simples).

O relógio astronómico funciona como um aperfeiçoamento dos temporizadores, ao conseguirem realizar a comutação através da identificação da altura do ano e do local. A determinação de forma automática da respetiva longitude e latitude, permite saber o momento do nascer e do pôr do sol em qualquer estação do ano, sem que assim o dispositivo necessite de um ajustamento manual.

Após as luminárias estarem ligadas podem ser aplicados sistemas de gestão do fluxo luminoso como, **sensores crepusculares** ou **sensores de movimento**.

Os sensores crepusculares, também designados de sensores de luz ambiente, ao reagirem à mudança de luminosidade exterior, admitem que seja possível controlar a quantidade de luz a emitir consoante as necessidades do local. Esta capacidade permite que as luzes estejam acesas em dias com más condições climatéricas (dias escuros, muita chuva, nevoeiro, etc), permite que a intensidade da luz vá aumentando à medida que o sol se põe e vá diminuindo à medida que este nasce, e permite ainda regular o fluxo em zonas onde existe muita luminosidade proveniente de outras fontes artificiais. Este mecanismo pode e é habitualmente utilizado apenas para comutação ON/OFF.

A deteção de movimento através de sensores é o método mais inovador no panorama da IP. O conceito consiste no principio de emitir a iluminação necessária à passagem de peões e veículos apenas quando estes realmente passam junto ao local. Este é um sistema que tem sido alvo de alguns testes em cidades e que se encontra associado a maiores dificuldades de implementação nomeadamente ao nível da segurança rodoviária (por exemplo um veículo deverá poder ver com clareza o que se encontra a alguns metros de si e não apenas quando aí se encontrar). Esta abordagem obriga a um estudo prévio, mas sendo bem aplicada em certos sítios, poderá representar uma forte poupança energética. Este sistema exige o emprego de lâmpadas em que seja possível fazer a regulação de fluxo total e em que o tempo de arranque e de reacendimento seja instantâneo, fatores esses que, como se sabe, se encontram especialmente associados às lâmpadas LED.

O meio ambiente é incerto e os fatores que influenciam as necessidades de iluminação não são constantes, por isso para se conseguir melhores percentagens de eficiência de energia, faz sentido muitas vezes a adoção de diferente sistemas de controlo de iluminação em simultâneo.

2.5.3 Telegestão

Aos sistemas de gestão mencionados, podem estar associadas operações de controlo remoto, que se designam por telegestão. Os sistemas de telegestão consistem numa infra-estrutura informática constituída por diferentes equipamentos que comunicam entre si pela rede, transferindo informação para um centro de controlo, da onde pode ser realizada uma supervisão e monitorização da IP em tempo real. Das vantagens deste sistema destacam-se as seguintes:

- Maior capacidade de adaptação às necessidades momentâneas;
- Recolha de informações estatísticas sobre cada luminária;
- Identificação de falhas na iluminação e deteção de postes de iluminação derrubados;

Para além de uma evidente melhoria na qualidade e aproveitamento da iluminação, este sistema, através dos dados estatísticos recolhidos, permite que se faça uma análise da informação recebida, de forma a que seja possível perceber as condições técnicas de exploração que podem ser melhoradas e ainda, adquirir conhecimentos das caraterística das luminárias e do local, que poderão influenciar possíveis planeamentos e investimentos em projetos futuros. Por último, a capacidade de saber a localização e o momento exato de falha de iluminação de uma luminária, evita que hajam equipas de manutenção a verificar o bom funcionamento de cada poste de iluminação, garantindo uma evidente poupança de custos.

Na sua constituição, os sistemas de telegestão habitualmente são compostos por um controlador de luminária (CL), um controlador de segmento (CS) e um sistema de gestão central (SGC), tal como mostra a figura 2.6.

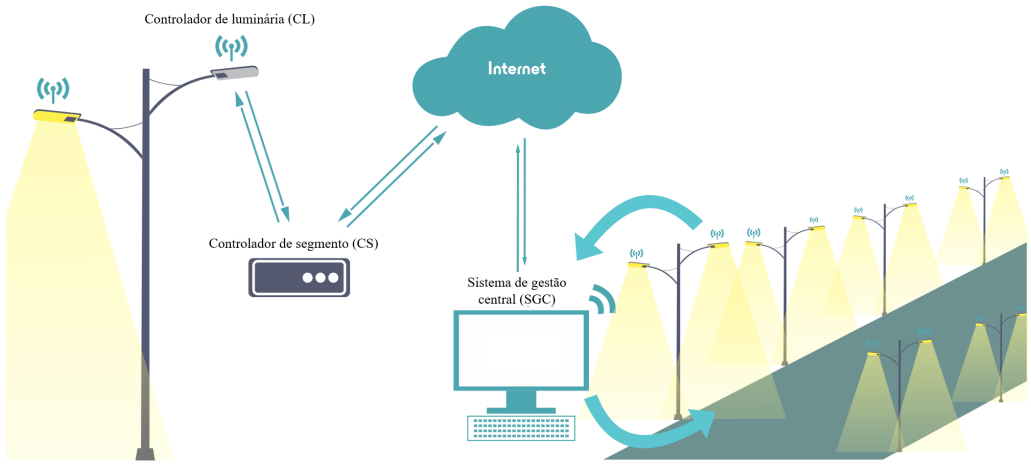


Figura 2.6: Sistema de telegestão
Fonte: Adaptado de *GisWorks* [25]

Ao **CL** cabe a função de controlar o dispositivo responsável pela regulação de fluxo (balastro ou driver) e outro tipo de aparelhos externos como sensores ou temporizadores. Pode ser instalado nos postes de iluminação já existentes ou, no caso dos postes de iluminação mais recentes, pode já vir integrado (normalmente no topo do mesmo).

O **CS**, normalmente apresentado no interior de uma cabine (responsável pelo fornecimento de alimentação), controla todo o segmento constituído por várias luminárias, servindo como meio de comunicação entre os CL e o SGC. Este dispositivo pode em alguns casos não ser necessário, sendo que a comunicação entre o CL e o SGC é feita diretamente.

Cabe ao **SGC**, gerir a informação recebida dos CL's e CS's, de forma a poder controlar remotamente todos os equipamentos da IP.

Hoje em dia, os sistemas de telegestão ainda não se encontram implementados em muitos locais, no entanto, este é um mercado em contínuo crescimento, com grandes empresas e fornecedores a investirem para apresentarem as suas soluções.

2.6 *Smart Cities*

Ao longo da última década, tem-se verificado um aumento da aplicação de dispositivos tecnológicos em cenários onde se pretende melhorar certos fatores de funcionamento, como simplificar atividades (e.g. através de sensores em parques de estacionamento) ou aumentar a segurança de um local (e.g. através de câmaras de videovigilância). A implementação destes equipamentos em diversas áreas da sociedade, promove uma cidade digital. Apesar de parecer semelhante, uma cidade digital não é equivalente a uma *Smart City*, pois uma cidade inteligente implica que a mesma seja digital, o inverso não é necessariamente obrigatório. Sendo assim, uma *Smart City* para além de incluir a instalação de diferentes aparelhos tecnológicos em vários setores da cidade, também garante a conexão e comunicação entre eles através da rede IoT (*Internet of Things*), de modo a otimizar ainda mais a eficiência de vários processos, gerindo sistemas de forma inteligente e melhorando assim a qualidade de vida dos cidadãos. O aparecimento da internet permitiu que todas as pessoas estivessem conectadas, uma *Smart City* permite que tudo esteja conectado.

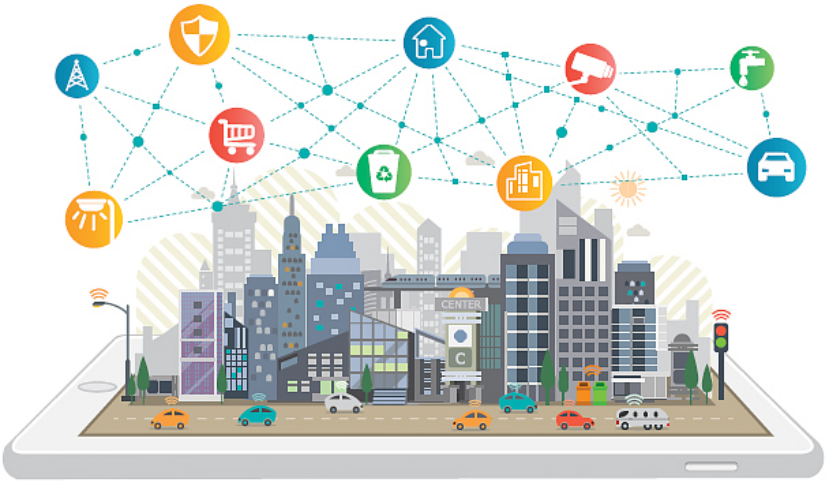


Figura 2.7: *Smart City*
Fonte: Adaptado de *Observatório das metrópoles* [26]

Na última edição do evento SCEWC em Barcelona, o responsável [27] pela área das *Smart Cities* da Deloitte, Miguel Eiras Antunes, afirmou que de uma forma geral, as cidades inteligentes podem gerar um retorno de 60 mil milhões de dólares (cerca de 54 mil milhões de euros) no mundo inteiro. O estudo apresentado salientou ainda a relevância de outros benefícios (para além do financeiro) como a redução da criminalidade ou do tráfego urbano e as melhorias nas áreas da saúde e do ambiente. A empresa garantiu ainda que mais de metade das grande cidades que

já apresentam uma elevada percentagem de tecnologia implementada no seu quotidiano, irão nos próximos anos investir em propostas de *Smart Cities*.

Relativamente a Portugal, Miguel Eiras Antunes destacou que "Portugal tem todas as condições para ser pioneiro a nível global na área das *Smart Cities*. Considero inclusive que, temos a dimensão adequada para com uma estratégia concertada a nível nacional, podemos ambicionar vir a ser uma referência enquanto *Smart Nation*, à semelhança de Singapura". Com uma margem de progresso muito grande, Portugal tem sido uma escolha de empresas de referência mundial na área das *Smart Cities* como a própria Deloitte ou a Schréder [28], para o desenvolvimento de soluções inteligentes a integrar nos municípios.

A iluminação pública é considerada um dos setores onde se prevê um maior investimento associado aos progressos das *Smart Cities*. Os postes de iluminação apresentam a vantagem de poderem estar associados a inúmeros dispositivos de recolha de informação e de a poderem retransmitir entre si. Hoje em dia, já existem exemplos de postes de iluminação inteligentes (ver figura 2.8) que podem apresentar na sua constituição:

- Sensores de presença e luminosidade;
- Sensores sonoros ou de medição do nível da água;
- Câmaras de videovigilância;
- Monitorizadores da qualidade do ar;
- Carregadores de veículos elétricos;
- Cartazes de publicidade digitais;
- Rede *wireless*;
- Entre outros;

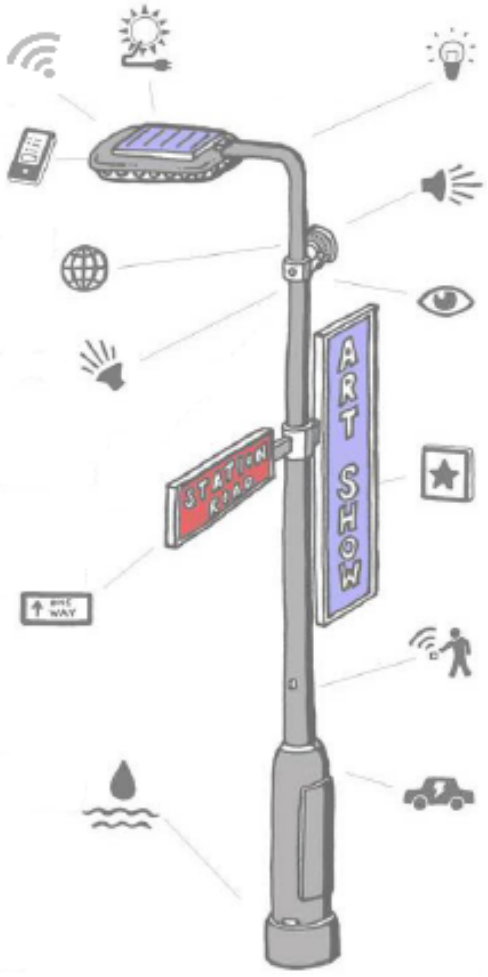


Figura 2.8: Poste de iluminação inteligente
Fonte: Bsi. (2017) [6]

A capacidade de recolha de muita informação externa, abre a possibilidade de explorar uma vasta gama de oportunidades onde estas vantagens podem ser inseridas. A título de exemplo, a viabilidade de detenção do fluxo de tráfego urbano, permitirá em tempo real otimizar o planeamento de rotas de veículos, indicar o caminho para um local com estacionamento vago ou assinalar a necessidade de os veículos se deslocarem para as bermas da estrada aquando da passagem de uma ambulância, através de um sinal visual (no poste de iluminação) em vez de um sinal sonoro (da ambulância).

A integração das luminárias em rede, de forma a criar sistemas IoT, pode ser conseguida através de uma comunicação física (cabo de rede) ou por *wireless* (Wi-Fi, Bluetooth, GSM, RF, ZigBee etc). Apesar de atualmente grande parte das luminárias que adotam sistemas inteligentes utilizarem redes RF, soluções de tecnologias de comunicação como ZigBee, LoRa ou NB-IoT têm ganho alguma preponderância nesta área.

A empresa mundial de recolha e análise de dados Counterpoint [29], estimou que em 2019 existiam apenas 18% de luminárias LED e apenas 2% das luminárias se encontravam conectadas. O diretor da empresa, Neil Shah, afirmou ainda que prevê que em 2023, a percentagem de postes de iluminação conectados irá subir até 15%. Já o relatório de previsões feito pela Northeast Group [4], indica que em 2028 as percentagens de luminárias LED e de postes de iluminação conectados de forma inteligente serão, respetivamente de, 85% e 24%. O crescimento do mercado da IP integrada em conceitos inteligentes, é uma realidade atual que se rege por principios relacionados com a definição de políticas de incentivo à criação de sistemas de iluminação mais eficientes, à evolução dos sistemas IoT e à contínua diminuição dos custos de lâmpadas e luminárias LED. Apesar da procura por soluções *Smart City* ainda não ser muito grande por parte dos municípios, os investimentos na oferta têm sido muitos, com grandes empresas de iluminação pública e até, empresas de fabrico de lâmpadas, a assumirem a sua prioridade em apresentar opções de mercado nesta área.

Capítulo 3

Tecnologias de comunicação

Com o intuito de perceber a forma como é realizada a partilha de informação na aplicação de algumas das soluções apresentadas nos sistemas de controlo e gestão da iluminação pública, este capítulo visa abordar o processamento e a transmissão de dados através das mais variadas tecnologias de informação e comunicação (TIC). A constante evolução tecnológica a que se tem assistido, associada a uma procura de novas TIC que consigam satisfazer as necessidades de certas aplicações recentes (e.g. as direcionadas às *Smart Cities*), tem resultado num desenvolvimento de diferentes alternativas associadas às redes de comunicação.

3.1 Redes de comunicação e Especificação geográfica

Uma rede consiste na interligação de nós (computadores ou outros dispositivos periféricos) de modo a que estes consigam comunicar e partilhar informação entre si. Existem diversas formas de ligar os dispositivos, consoante meios de transmissão e protocolos de comunicação, sendo que quanto maior o número de nós existentes na rede, maior será a sua complexidade e o seu alcance. O exemplo mais fácil de identificar é possivelmente o caso da internet, onde a rede se estende à escala mundial.

Existem múltiplos fatores que permitem distinguir diferentes tipos de redes e um deles prende-se com a sua especificação geográfica, destacando-se:

- **PAN** (Rede de área pessoal), apresenta um alcance reduzido que permite a comunicação entre um computador e vários dispositivos que se encontrem habitualmente no interior de uma residência. Uma simples conexão entre um computador pessoal e um telemóvel é um exemplo de uma rede deste tipo.
- **LAN** (Rede de área local), interliga computadores e diferentes dispositivos que se encontrem dentro do mesmo espaço físico, como faculdades ou empresas. Dentro das rede LAN, as redes usadas em distâncias mais limitadas, nomeadamente no interior das casas, dão-se pelo nome de **HAN** (Rede de área doméstica).
- **MAN** (Rede de área metropolitana), contém uma área de atuação superior à das redes locais. Ao garantir a conexão de várias LAN, esta rede possibilita que diferentes computadores

se encontrem interligados mesmo encontrando-se em edificios distintos. Habitualmente, apresenta um alcance correspondente ao tamanho de uma cidade.

- **WAN** (Rede de longa distância), é de todas as redes mencionadas, a que apresenta capacidade de abranger áreas geográficas mais extensas, como países ou continentes. Este tipo de rede oferece vantagens de flexibilidade de comunicação e de facilidade acesso a informação por parte de grandes empresas com sedes em diferentes países.

Quando qualquer um dos tipos de rede mencionados funciona por *wireless*, ou seja, sem recorrer a um cabo de rede, é acrescentada a letra *W* no início de cada acrónimo. Existem assim as redes **WPAN**, **WLAN**, **WMAN** e **WWAN**.

3.2 Topologias de rede

A topologia de rede representa a forma como a mesma se encontra organizada, tanto física como logicamente. A topologia lógica descreve o modo como os dados são transmitidos através da rede, enquanto que a física, retrata a organização das interligações entre os vários nós da rede. A diferentes estruturas correspondem diferentes resultados em certos fatores como a velocidade, o custo ou a segurança. As topologias de **barramento**, **estrela**, **anel**, **malha** e **árvore** são as que se usam mais frequentemente.

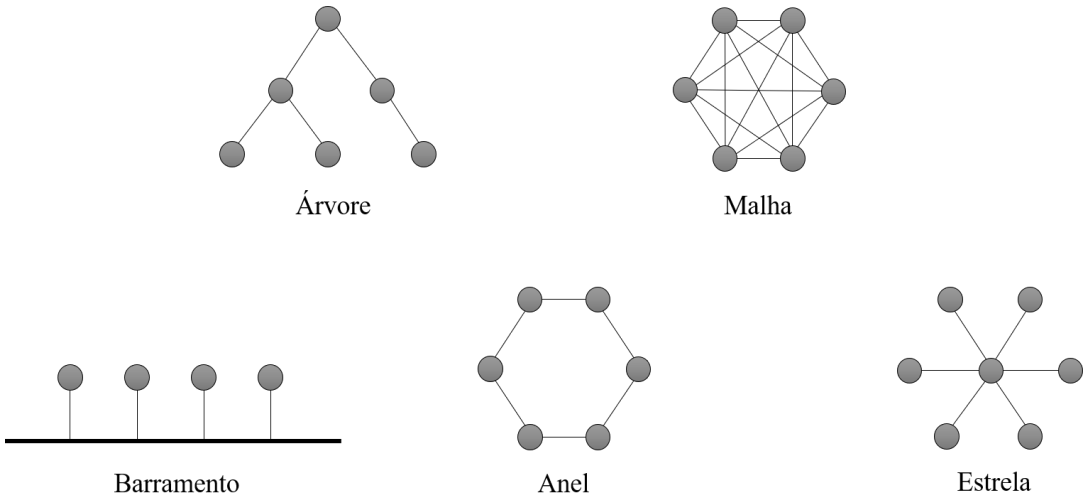


Figura 3.1: Topologias de rede
Fonte: Elaborado pelo autor

A topologia em **barramento** é considerada a mais simples de implementar e consiste na ligação de vários computadores a um cabo contínuo por onde circulam os pacotes de dados. Sendo que cada computador apresenta um endereço identificativo, e que é feita uma comunicação por *broadcast*, permitindo que todos os computadores ligados ao barramento tenham a capacidade de

ver a informação a circular, os pacotes de dados contém um cabeçalho onde se encontra o endereço correspondente ao computador destinatário, de modo a que apenas este receba a informação pretendida.

Tabela 3.1: Vantagens e Desvantagens de cada topologia

Topologia	Vantagens	Desvantagens
Barramento	(+) Baixo custo (+) Facilidade de implementação (+) Comunicação direta (sem encaminhamento) (+) Menos cabo em comparação com outras topologias	(-) Dificuldade em mudar nós (-) Dependência da barra (falha põe em causa todo o sistema) (-) Apenas um computador de cada vez pode estar a transmitir
Árvore	(+) Flexibilidade de alterações (+) Facilidade de manutenção e diagnóstico	(-) Custo considerável (-) Complexidade de instalação (-) Dependência do nó central (falha põe em causa todo o sistema) (-) Limitação da distância máxima
Anel	(+) Facilidade de implementação (+) Baixa distorção e atenuação (+) Maior número de nós não influencia a qualidade do sistema	(-) Dificuldade em localizar falhas e reconfigurar a rede (-) Maior número de nós influencia a duração da transmissão (-) Dependência dos nós (falha põe em causa todo o sistema)
Estrela	(+) Independência dos nós externos (a avaria destes nós, não influencia o sistema) (+) Facilidade em acrescentar novos nós ao sistema (+) Facilidade de deteção de falhas (+) Protocolos de comunicação simples	(-) Custo de implementação (-) Número limite de portas no nó central (-) Dependência do nó central (falha põe em causa todo o sistema)
Malha	(+) Elevada tolerância a falhas (+) Independência dos nós (a avaria de um nó não influencia o sistema (+) Tempos de espera reduzidos	(-) Elevado overhead (que conduz a uma redução no desempenho) (-) Rede de grande complexidade (-) Considerável custo de instalação

A topologia em **árvore** usa os principios da topologia em barramento, acrescentando a existência de ramificações de nós, possibilitando o envio dos sinais por dois caminhos diferentes. Apresentando uma estrutura hierárquica com um nó central que se encontra interligado a outros nós, esta topologia, quando comparada com a anterior, possui maior dificuldade de implementação mas maior facilidade de diagnóstico em caso de falha.

Uma rede com topologia em **anel**, consiste num circuito fechado, cujos nós se encontram conectados em série entre si. Cada nó contém um sistema de receção e transmissão de dados, permitindo que ao receber informação, o nó possa transmiti-la ao nó seguinte. Os pacotes de dados ao conterem o endereço do computador destinatário, vão circulando apenas numa direção, de nó em nó, até chegar ao destino. Um maior número de computadores implica um maior intervalo de tempo entre o emissor e o recetor, e provoca uma diminuição na confiabilidade da transferência.

Atualmente, a topologia mais utilizada tem a aparência de uma **estrela**. Nesta disposição, existe um nó central que se encontra ligado a todos os restantes nós, tendo a função de gerir os dados que lhe chegam de forma a direcioná-los para o nó destinatário correspondente. Sendo assim, qualquer informação a ser enviada pelo emissor, não passa por todos os nós mas passa obrigatoriamente pelo nó central. Este formato garante um reduzido número de falhas no sistema devido à independência dos nós externos relativamente ao funcionamento do sistema. Em sentido oposto, uma falha no nó principal é suficiente para impedir qualquer tipo de desempenho da rede.

Por último, a rede em **malha** (também designada pelo seu termo em inglês - *Mesh*), é possivelmente a topologia que apresenta um maior número de possibilidades de aplicação. A presença de variados, todos nós conectados entre si (existem porém alguns casos onde certos nós não se encontram interligados), permite que a informação possa circular entre um nó transmissor e o respetivo recetor, através de diferentes caminhos. Tendencialmente sendo uma topologia com muitos nós e por isso conseguindo grandes alcances, são muitas vezes utilizadas em redes WAN ou WWAN.

3.3 Modos de interação

Dentro de uma rede, de forma a que se consiga realizar comunicações corretas e eficazes, é importante definir a forma como é feita a interação entre dois nós (ou entre intervenientes diferentes no mesmo nó). Para isso, recorre-se ao estabelecimento das funções e tarefas que cada nó deve estar sujeito, garantindo assim uma correta sincronização durante a comunicação. De entre outras possíveis interações, destacam-se as seguintes:

- **Cliente/Servidor** - Através da troca de mensagens, seguindo protocolos de comunicação, esta interação funciona num modelo de pedido/resposta. Habitualmente, o cliente inicia a comunicação através de uma requisição e espera indefinidamente pela resposta por parte do servidor central (associado a uma topologia em estrela). Estando continuamente a executar serviços necessários ao funcionamento da rede, o servidor responde ao pedido do cliente, partilhando os recursos pedidos pelo mesmo (ou em caso de erro indicando a falha correspondente). Este sistema obriga a custos consideráveis, mas garante grande capacidade de segurança da rede.

- **Ponto-a-Ponto** - Possivelmente o modelo de comunicação mais simples de instalar e operar, a interação também conhecida pelo seu termo em inglês, *Peer-to-Peer*, corresponde à conexão entre dois nós, dos quais, tanto um como outro podem funcionar simultaneamente como clientes ou servidores. A descentralização de um servidor regulador, permite uma maior facilidade de compartilhamento de arquivos e uma maior independência e controlo por parte de cada dispositivo. A presença de poucos nós nesta arquitetura garante uma boa eficiência no uso da rede. Pelo contrário, a adição de mais dispositivos poderá pôr em causa a segurança da mesma e a sua simplicidade de coordenação.
- **Produtor/Consumidor** - Ao contrário do que acontece no modelo Cliente/Servidor, neste caso, o *trigger* de início de comunicação é dado pelo destinatário (produtor). É feita uma comunicação *broadcast*, ou seja, a mesma mensagem é enviada com destino a todos os dispositivos recetores que irão posteriormente a analisar a informação.

3.4 Transmissão de dados

Cada transmissor/recetor deve ser pré-configurado num dos seguintes três modos:

- ***Simplex***
- ***Half-Duplex***
- ***Full-Duplex***

O mesmo modo tem de ser utilizado em cada um dos extremos da transmissão para que a forma como a comunicação se deve comportar seja compreendida por cada um dos nós. Fazendo uma analogia com uma estrada, cada modo serve para definir a forma como os carros se deslocam, sendo a estrada o meio de transmissão entre o emissor e o recetor.

Uma transmissão em modo ***Simplex*** é unidireccional. Na analogia da estrada, a mesma só tem uma via e é de sentido único. Apesar de hoje em dia já ser raro encontrar este tipo de interação, é uma solução bastante económica e fácil de instalar.

Se à mesma estrada (só de uma via) for adicionada a possibilidade dos carros se deslocarem nos dois sentidos, tem-se uma transmissão ***Half-Duplex***. Por último, a solução mais completa e eficiente por ser bidireccional consiste numa transmissão ***Full-Duplex***. Nesta estrada, os carros podem não só, circular nos dois sentidos, como podem ainda fazê-lo simultaneamente pois a mesma apresenta duas vias. Para além do modo de transmissão, as comunicações podem diferir umas das outras ao serem:

- **Síncronas** ou **Assíncronas**
- **Em série** ou **em paralelo**

Quando a transmissão é **assíncrona**, não existe um sinal de *clock* que indique o instante de transmissão, sendo que a mesma, corresponde ao envio de carateres individuais que têm de conter um bit identificativo de início do carater (*Start bit*) e um bit identificativo do fim do carater (*Stop*

bit). Transmissões que se realizam de forma **síncrona**, usufruem de um mecanismo de sincronização de um relógio em cada extremidade da comunicação. Sempre que há uma transmissão, é enviado um pacote de informação contendo os dados e símbolos especiais que permitem garantir uma baixa suscetibilidade a falhas e uma maior eficiência. A transmissão síncrona apresenta ainda vantagens relativamente à quantidade de dados que se pretende transmitir e à distância a que mesma é realizada. Relativamente às transmissões **em série** ou **em paralelo**, a grande diferença prende-se com o facto de no primeiro caso os dados serem emitidos bit a bit, um de cada vez, enquanto no segundo, cada transferência implica o envio simultâneo de vários bits.

3.5 Mecanismos de acesso ao meio

Por norma, numa rede existe um meio partilhado por vários nós. Se em qualquer momento dois nós transmitirem em *broadcast* uma mensagem, irão existir colisões que provocarão falhas na comunicação. Para evitar que este problema aconteça, deve-se recorrer a mecanismos que controlem o acesso do fluxo de dados ao meio. Estes métodos baseiam-se num processo de multiplexagem (técnica de partilha de vários canais de comunicação num só meio de transmissão), podendo ser definidos na LLC (sub-camada da camada de ligação de dados do modelo OSI - será mencionado mais à frente), sendo responsáveis por determinar os tempos de espera no acesso à rede e pelo impacto nos atrasos da mesma. O método de multiplexação pode ser feito através de divisões de frequência ou divisões temporais, tal como mostra a figura 3.2 (existe ainda a multiplexação por divisão de códigos, no entanto não será examinada nesta dissertação). Dentro da multiplexagem por divisões temporais existem, entre outros mecanismos, dois grandes grupos: os de acesso controlado e os de acesso não controlado. **TDMA**, **Token-Passing** e **Mestre-Escravo** são mecanismos referentes ao primeiro grupo, o qual se destaca por ser a rede a definir o momento de início da transmissão. Relativamente ao grupo dos de acesso não controlado, dos quais fazem parte mecanismos como **CSMA/CA**, **CSMA/BA** ou **CSMA/CD**, qualquer mensagem começa a ser transmitida no instante em que os nós emissores pretenderem.

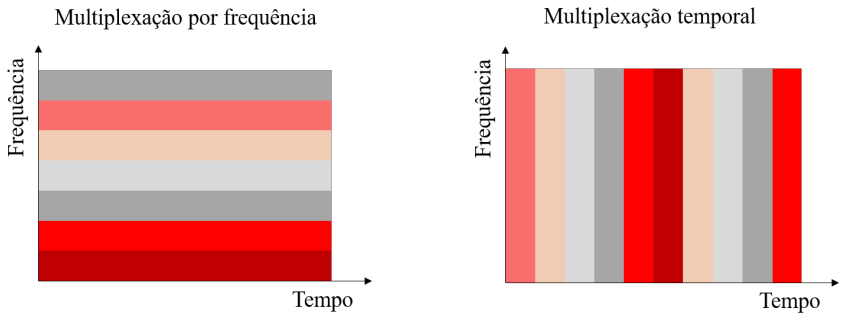


Figura 3.2: Técnicas de multiplexagem

Fonte: Elaborado pelo autor

A multiplexagem por divisões de frequência, **FDMA**, consiste no envio dos sinais simultâneamente, através da divisão de uma certa banda de frequências em faixas de frequência estreitas (canais), as quais serão atribuídas a diferentes nós dentro de uma rede. As transmissões entre um emissor e um recetor, são efetuadas apenas num único canal, o qual fica reservado durante toda a comunicação. Esta técnica é frequentemente utilizada em módulos de rádio, responsáveis por definir o número de canais e a largura de banda de cada faixa.

O mecanismo **TDMA**, utiliza o mesmo canal de frequência para a comunicação com diferentes nós. Para isso, divide o mesmo em diferentes gamas temporais que se encontram definidas entre os dispositivos de forma a que comunicação com cada um dos nós seja feita apenas no correspondente intervalo de tempo, evitando assim qualquer tipo de interferência. Este método exige uma grande sincronização nas transmissões e apresenta baixos níveis de eficiência, dado que mesmo que não seja necessária a comunicação com um certo nó, o intervalo de tempo correspondente ao mesmo é de igual forma tido em conta.

A técnica **Token-Passing**, faz jus ao nome ao fazer uso de um sinal de controlo denominado *token* que vai circulando de nó em nó. Este sinal funciona como um "semáforo", do qual apenas o nó que o contém, apresenta luz verde para transmitir os dados. Cada nó apresenta um número de ordem, sendo que o *token* vai percorrendo os vários nós de forma decrescente de número de ordem, até completar a totalidade de nós. Esta forma de atuar, aproxima-se de uma rede com topologia em anel, sendo por isso muito natural encontrar esta técnica com o nome de Token-Ring. Esta estratégia evita colisões, no entanto obriga a que seja feita uma sincronização para garantir que em cada instante, um e um só nó possua o *token* e que o mesmo circule por todos os nós.

Para finalizar o grupo de multiplexagem por divisões temporais de acesso controlado, tem-se o método **Mestre-Escravo**. Neste caso, a comunicação com qualquer um dos nós escravos é sempre inicializada pelo nó mestre. Como qualquer transmissão só é feita no instante em que o mestre pretende ativar a comunicação com um certo escravo, a eficiência é consideravelmente melhor do que a dos dois métodos anteriormente mencionados. Por outro lado, este método apresenta uma dependência do funcionamento do mestre e não está completamente livre de colisões. A título de exemplo, se um mestre fizer um pedido de certos dados a dois escravos consecutivos, pode acontecer que a resposta do primeiro escravo seja dada quando o mestre já se encontra a inicializar a comunicação com o segundo escravo. Este tipo de problemas podem ser resolvidos no sistema, tanto a nível de *hardware*, como de *software*.

Entrando no grupo de multiplexagem por divisões temporais de acesso não controlado, o **CSMA/CA** foi criado para ser aplicado especialmente em redes *wireless* onde as colisões podem acontecer mas são muito complicadas de detetar. Nesse sentido, este método procura prevenir interferências entre sinais através da partilha de informação sobre o início da transmissão e o tempo previsto de duração da mesma. A fim de um nó perceber se pode iniciar a comunicação, é aplicado o método RTS/CTS (*Request to send* / *Clear to send*) para verificar a disponibilidade do meio. O nó que pretende transmitir envia um RTS para o nó recetor e em caso de receção de um CTS por parte do remetente, este sabe que poderá iniciar a transmissão de dados. Após o início da transmissão, o meio mantém-se ocupado até ao instante em que o recetor recebe todos os dados.

Ao contrário do método anterior, o **CSMA/CD**, aplicado em meios físicos, permite a qualquer nó verificar se o meio se encontra livre caso pretenda transmitir dados. Na eventualidade de estar ocupado, o nó fica continuamente a examinar a disponibilidade do meio. Havendo mais do que um nó nesta situação, no momento em que o meio fica livre, ambos iniciam uma transmissão, gerando-se uma colisão. Contrariamente à estratégia de outras técnicas, esta em vez de procurar diminuir o número de colisões, prefere minimizar as suas consequências. Para isso, os nós emissores encontram-se atentos à rede enquanto estão a transmitir com o intuito de suspender a emissão em caso de colisão. Adicionalmente, esse mesmo nó envia um sinal a todos os restantes a informar que houve uma colisão. Em seguida, é atribuído um período de tempo aleatório a cada um dos nós de colisão, para no fim desses tempos voltarem a transmitir.

Por fim, **CSMA/BA** é um mecanismo que difere do anterior por não ser destrutivo relativamente às interferências durante as emissões. Quando é iniciada uma transmissão, é incluído um valor de prioridade, o qual será fundamental para decidir qual a mensagem que continua a ser emitida em caso de colisão. A mensagem cuja prioridade é menor, reinicia a sua transmissão no fim do envio total da mensagem com prioridade maior durante a colisão.

3.6 *Trigger* de envio por tempo ou por eventos

Mensagens que são enviadas numa rede em tempo real por um emissor, encontram-se associadas a entidades de tempo real (por exemplo sensores). Para serem iniciadas, estas transmissões têm de estar sujeitas a uma ativação (*trigger*) que pode estar relacionada com um evento externo ou com um período temporal. Imagine-se o exemplo da figura 3.3, onde um dispositivo transmissor se encontra conectado a um sensor de humidade. Os valores de humidade estão continuamente a ser lidos pelo sensor e a ser recebidos pelo dispositivo. Este, irá emitir uma mensagem com o correspondente valor de humidade para um nó recetor. Se, independentemente do valor recolhido pelo sensor, o transmissor estiver configurado para enviar essa mensagem ao fim de um certo intervalo de tempo, trata-se de uma transmissão cujo *trigger* foi dado por tempo. Em contrapartida, caso a mensagem seja enviada apenas quando se deteta que a humidade foi alterada, diz-se que o *trigger* foi dado por um evento externo (tendencialmente a transmissão é assíncrona).

O ***trigger* por tempo** é integrante de uma transmissão por controlo autónomo, na qual a aplicação indica o que transmitir e a rede assinala o instante a transmitir. Se por um lado, traz vantagens associadas à tolerância a possíveis falhas e à capacidade de deteção de transmissões não recebidas (que todavia teriam sido enviadas), mas por outro lado, está sujeita a uma implementação mais complexa, com dificuldades em conseguir retransmitir uma mensagem se necessário.

Quando o *trigger* é dado por um **evento**, o controlo da transmissão é feito externamente, sendo que a aplicação indica quando e o que transmitir. Apresenta caraterísticas relativas à tolerância de falhas, deteção de omissões, complexidade de implementação e capacidade de retransmissão, opostas às mencionadas para *triggers* por tempo.

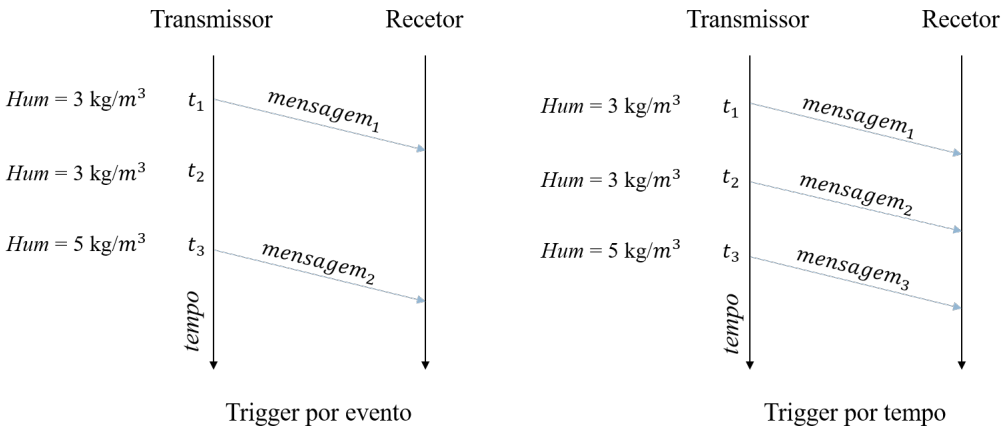


Figura 3.3: *Trigger* de transmissão
Fonte: Luís Almeida (2018) [30]

3.7 Protocolo de comunicação

Um protocolo de comunicação especifica um conjunto de normas singulares que permitem a conexão, transferência de dados e correspondente capacidade de interpretação entre duas máquinas diferentes. Podendo ser implementados ao nível do *software*, *hardware* ou ambos (o mais habitual), estes variam muito consoante o objetivo e a complexidade do sistema. No contexto de uma rede, tendencialmente, não é suficiente recorrer a um protocolo de comunicação para lidar com todos os detalhes de uma comunicação. Sendo assim, são utilizados diferentes tipos de protocolos consoante a tarefa a desempenhar, protocolos esses que são agrupados em pilhas com diferentes camadas, onde cada camada corresponde a um protocolo. As pilhas protocolares cujas camadas trabalham em conjunto para garantir um funcionamento distintivo, seguem uma composição padrão de referência designada por modelo OSI.

3.8 Modelo OSI

Apesar de ter sido criado em 1971, ainda hoje o modelo OSI é usado para descrever protocolos recentes. Funcionando apenas como uma diretriz genérica e abstrata, uma vez que não implementa concretamente nenhum protocolo, o modelo é constituído por sete camadas, determinantes para que dois dispositivos com *hardware*, *software* e sistema operativo diferentes consigam comunicar. A estratificação do modelo e descrição da circulação dos dados aquando se dá uma comunicação, podem ser verificadas na figura 3.4.

Sempre que um dispositivo pretende enviar qualquer tipo de dados, encaminha-os para a camada de topo do modelo, a camada de aplicação. A tarefa correspondente a esta camada é executada e de seguida, os dados são enviados para a camada inferior. O processo repete-se até que os dados cheguem à camada física, onde são efetivamente transferidos para o dispositivo recetor. De forma análoga, o processo de receção e leitura dos dados repete-se, mas desta vez o sentido de circulação dos dados inverte-se, sendo feito da camada inferior até à superior.

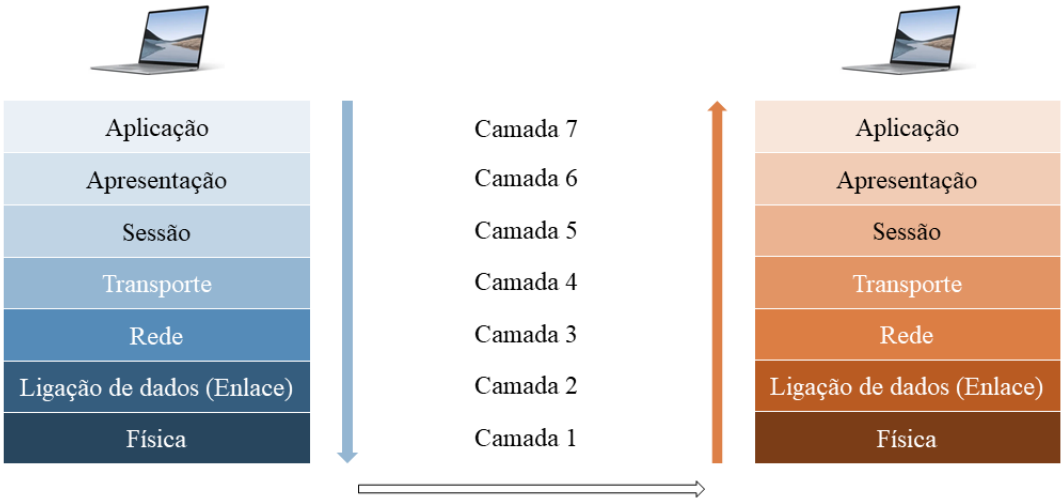


Figura 3.4: Modelo OSI
Fonte: Elaborado pelo autor

A **camada de aplicação** é responsável por definir a forma como as ações interagem na rede através da especificação do protocolo a utilizar, tendo em conta a tarefa proposta (por exemplo, envio de uma mensagem de correio eletrónico ou transferência de arquivos). HTTP, DNS, DHCP ou FTP são alguns exemplos de protocolos utilizados, os quais permitem uma interação entre a máquina e o utilizador. Esta camada é implementada única e exclusivamente por *software*.

Os dados enviados pela camada 7, são recolhidos pela **camada de apresentação**, onde serão convertidos e uniformizados de forma a poderem ser utilizados pelo mesmo protocolo, independentemente dos tipos de dispositivos em utilização. Adicionalmente, esta camada é responsável por comprimir os dados de forma a que comunicação seja realizada mais rapidamente e por realizar processos de encriptação da informação, com o intuito de aumentar a segurança na comunicação (a descodificação dessa informação é feita nesta mesma camada do lado do recetor).

A **camada de sessão** encontra-se encarregue de de definir a forma como a ligação entre dispositivos é feita (estabelecimento dos modos de transmissão dos dados). Também nesta camada são efetuados mecanismos de incremento da segurança da informação e verificação de existência de erros. Esta análise é feita através do estabelecimento de metas relativas à informação a transmitir. Caso a meta seja atingida, confirma-se-á se a informação foi corretamente enviada. Não tendo sido, a mesma será reenviada. Esta estratégia permite que na eventualidade de ocorrência de uma falha na rede, a comunicação seja reiniciada a partir da última meta atingida.

A camada 4 separa dois grupos: o grupo das camadas de nível de aplicação (camadas 5, 6 e 7) e o grupo das camadas de nível físico (camadas 1, 2 e 3). Ao fazer a ligação entre estes dois grupos, a **camada de transporte** garante a verificação de erros ao receber os dados da camada superior, a divisão destes mesmos dados em pequenos segmentos e o envio dos segmentos correspondentes à camada de rede. No recetor, o mesmo processo é realizado mas de forma inversa, de modo a que a informação seja agrupada na camada de transporte para ser enviada à camada de sessão. Existe ainda um sistema de correção de erros e controlo de fluxo de informação nesta

camada 4, recorrendo a dois tipos de serviços de ligação: ligação orientada (*connection-oriented*) e ligação livre (*connectionless*). Numa ligação orientada, o protocolo de transporte utilizado é o TCP, que através de mensagens de ACK (segmentos de informação que indicam o estado da receção da informação), garantem uma comunicação fiável (sem perdas, nem duplicações). Alguns protocolos da camada de aplicação, como HTTP ou FTP, exigem uma grande segurança na comunicação, recorrendo por isso ao serviço *connection-oriented*. Quando a ligação é livre, o protocolo de transporte designa-se UDP. Não existe uma verificação de erros, nem controlo de fluxo, pelo que em caso de falha na comunicação, todos os dados têm de ser reenviados. Apesar da comunicação não ser fidedigna, a mesma ocorre de forma muito mais rápida do que a anterior (existindo alguns protocolos da camada superior que preferem rapidez a segurança).

Qualquer máquina presente numa rede contém um endereço lógico identificativo (o qual pode sofrer alterações), denominado endereço IP (por exemplo, 153.127.192.15). A **camada de rede**, através de diferentes protocolos, é a responsável por encaminhar os diferentes pacotes de dados tendo em conta o melhor caminho a percorrer entre os endereços IP de origem e de destino. Este processo, que se dá pelo nome de *routing*, permite que a informação circule ao longo de diferentes segmentos de rede, através de dispositivos *routers*. Esta camada permite ainda que seja feito um controlo do congestionamento do tráfego de rede, através da capacidade de dar prioridade a certos pacotes.

A última camada antes do meio físico designa-se por **camada de ligação de dados** e pode ser dividida em duas subcamadas: LLC e MAC. LLC é a subcamada superior, responsável pelo endereçamento lógico, onde é feito o controlo de acesso ao meio através dos mecanismos referidos em 3.5. A subcamada inferior (MAC) que funciona como uma interface entre a subcamada LLC e o meio físico, garante um controlo do fluxo de dados e usufrui da capacidade de deteção de pacotes recebidos com defeito (que podem eventualmente ser corrigidos, de forma a que as camadas superiores possam assumir a receção de informação sem erros). Como cada placa de rede contém um endereço MAC (por exemplo, 00:1B:44:11:3A:B7), esta subcamada usa esses endereços para identificar os dispositivos de destino e enviar os pacotes, sendo assim responsável por um endereçamento físico. Salienta-se que o endereço MAC distingue-se do endereço IP por ser atribuído pelo fabricante, não estar associado a nenhum protocolo e por ser único e imutável.

A camada mais baixa do modelo OSI, a **camada física**, define as caraterísticas mecânicas e elétricas da transferência de pacotes. Ao especificar os dispositivos participativos na comunicação e os meios de transmissão, a camada representa fisicamente o caminho dos dados até ao nó de destino.

3.9 Consumo de energia

A energia consumida no processo de transmissão de dados entre dispositivos pode variar consoante diferentes parâmetros que influenciam a comunicação:

- Potência de transmissão
- Taxa de dados

- Tráfego da rede
- Codificação de controlo de erros
- Tipo de gestão do acesso ao meio
- Tipo de controlo da transmissão

Um controlo autónomo da transmissão obriga a que o sistema esteja em funcionamento contínuo, sendo elevado o consumo de energia. Por sua vez, numa comunicação sincronizada (de preferência com um baixo *duty-cycle*), garante-se a inexistência de falhas, evitando-se a necessidade de retransmissões, reduzindo assim possíveis gastos adicionais de energia.

Taxas de dados elevadas, exigem um maior consumo de energia. Não obstante, essa propriedade apesar de garantir que as velocidades de transmissão diminuam, encontra-se associada a um aumento das probabilidades de ocorrência de erros.

Por si só, grandes potências de transmissão obrigam a grandes consumos, no entanto, estas recorrem a um menor número de nós em redes *mesh*, evitando maiores gastos de energia em processos de armazenamento e envio de informação em cada nó.

3.10 Modulação de sinais digitais

Para que o sinal a transmitir por um dispositivo emissor apresente as caraterísticas adaptáveis ao meio de transmissão, deve ser aplicado o processo de modulação. Tal como o nome indica, este método visa moldar o sinal através de variações em caraterísticas como a amplitude ou o comprimento de onda. Do lado do recetor, o sinal recebido sofre um processo inverso (demodulação) para obter o sinal original. Entre outras vantagens, este método permite uma maior imunidade ao ruído e por isso uma maior robustez na transmissão, maior sensibilidade de adaptação às condições do meio, maior segurança e apresenta a capacidade de garantir que o sinal seja transmitido na banda de frequências desejada. Apesar de poderem ser aplicadas técnicas de modulação tanto em sinais analógicos como digitais, o conceito de modulação analógica não é abordado, dado que é frequentemente utilizado em objetivos diferentes daqueles que são pretendidos para esta dissertação (como na difusão de som ou em sinais de televisão).

Quando o sinal é digital, a mensagem que se pretende transmitir faz parte de um conjunto de algarismos discretos. Habitualmente as transmissões digitais são binárias, representadas pelos símbolos 1 e 0, sendo transmitidos sequencialmente, como mostra a figura 3.4.

As técnicas de modulação digital utilizam frequentemente uma onda portadora sinusoidal para transmitir informação através de variações das caraterísticas de amplitude (ASK), frequência (FSK) ou fase (PSK) da onda.

A modulação por chaveamento de **amplitude** (ASK) consiste no método mais simples de implementar em comparação com os seguintes. A amplitude da onda varia apenas entre dois valores. Quando a onda digital transmite um pulso corresponde ao valor 1, a onda sinusoidal é apresentada com uma certa amplitude. A amplitude da mesma apenas se altera quando se dá uma ausência de pulso, correspondente ao valor binário 0.

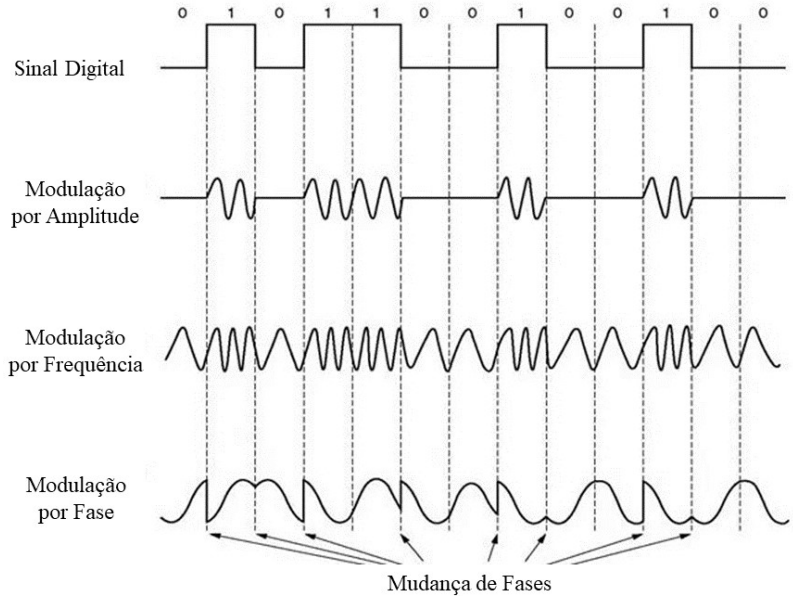


Figura 3.5: Modulação Digital
Fonte: Adaptado de Robert A. Witte (2014) [31]

Quando a modulação é feita por chaveamento de **frequência** (FSK), o procedimento é semelhante ao anterior, contudo neste caso a amplitude mantém-se constante ao longo da onda, variando apenas a frequência. Sendo assim, em transmissões binárias, a frequência é igual a um valor predefinido para níveis lógicos 1 e igual a outro valor diferente também previamente definido para níveis lógicos 0. Este tipo de transmissões podem também designar-se por BFSK. Caso sejam introduzidos mais valores de frequência (atribuindo mais bits por cada valor), a modulação dar-se-á pelo nome de MFSK.

Uma vez mais, de modo semelhante aos processos anteriores, a modulação por chaveamento de **fase** (PSK), faz variar o parâmetro da fase da onda, mantendo tanto a amplitude, como a frequência constantes. Tal como se verifica na figura 3.4, a fase da onda varia sempre que ocorre uma transição de níveis lógicos. Em transmissões binárias, este tipo de modulação também é conhecida como BPSK.

3.11 Comunicações físicas e *wireless*

Atualmente, as comunicações podem ser realizada através de um meio físico (comunicação cablada) ou através do ar (comunicação *wireless*). Dado que qualquer um dos meios onde a comunicação é feita apresenta vantagens e desvantagens em relação ao outro (tabela 3.2), a escolha do meio depende das necessidades da rede e da comunicação.

O canal físico pode ser por meio de um fio de cobre (o mais habitual) ou por meio de um cabo de fibra ótica (tecnologia mais recente e mais cara, ainda pouco utilizada mas com uma enorme margem de aplicabilidade no futuro).

Tabela 3.2: Vantagens e Desvantagens do meio de transmissão

Tipo de Comunicação	Vantagens
Cablada	Maior segurança Maior velocidade Custo de implementação menor
Wireless	Redução da cablagem Maior mobilidade Maior capacidade de expansão da rede Maior facilidade de instalação Maior facilidade de manutenção Mercado de exploração em expansão

3.11.1 Comunicações cabladas

Um dos propósitos básicos dos fios de cobre é servir de meio de transmissão em comunicações série (cuja definição foi referida em 3.4). Das principais comunicações série, realça-se:

- **UART** é um transcetor que converte a informação recebida em paralelo para dados em série, prontos a transmitir. Habitualmente presentes no interior de dispositivos, como por exemplo microcontroladores, permitem que seja feita uma comunicação assíncrona, a qual, relembrando o que já foi mencionado atrás, ao não apresentar um relógio de sincronismo, adiciona aos pacotes de envio um *Start bit* e um *Stop bit*. O tamanho do pacote, assim como a velocidade (definida através do parâmetro *baudrate*) devem ser configurados de forma igual, tanto do lado do emissor, como do lado do recetor. Esta comunicação funciona através de um mecanismo de acesso ao meio por Mestre-Escravo único (não permite múltiplas configurações deste método) e visto que apenas necessita de um cabo singular para transmitir informação (Tx) e outro para recebê-la (Rx), permite que essa interação seja *Full-Duplex* (visível em 3.6).

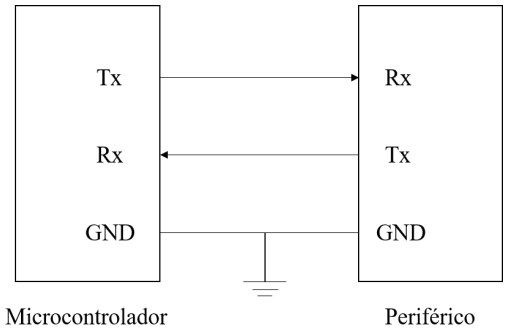


Figura 3.6: UART
Fonte: Elaborado pelo autor

- **SPI** distingue-se logo da comunicação série anterior por ser síncrona e por funcionar apenas a curtas distâncias (cerca de 20 centímetros). Mestre-Escravo é o tipo de interação empregue, existindo apenas um mestre (habitualmente um microcontrolador) e podendo existir vários escravos (como mostra a figura 3.7).

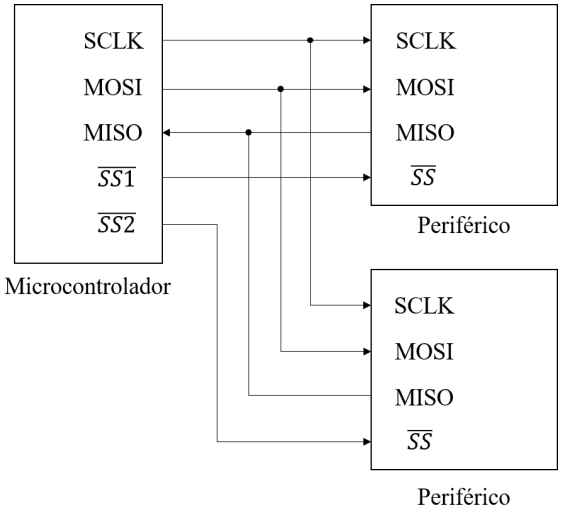


Figura 3.7: SPI
Fonte: Elaborado pelo autor

Para funcionar corretamente, esta comunicação necessita de quatro pins (MOSI, MISO, SCLK e SS) presentes em cada um dos dispositivos.

Os canais MOSI e MISO desempenham a função de transmitir a informação entre o mestre e o escravo (o MOSI envia os dados do mestre para o escravo e o MISO faz a tarefa inversa). Em SPI, sempre que um bit é enviado pelo MOSI, um outro bit é recebido pelo MISO, tratando-se assim de uma comunicação *Full-Duplex*.

O canal SS é utilizado pelo mestre para definir com qual escravo irá comunicar, de forma a que o escravo com este canal ativo saiba que os dados vindos da MOSI são para si e que pode gerar dados na MISO. Na presença de vários escravos, o mestre deverá conter um canal SS para cada um destes.

Por último, o canal SCLK é aquele que permite que a transmissão seja síncrona. Na sua representação, SPI obriga a que os módulos sejam configurados consoante um de quatro modos referentes à polaridade (CPOL) e à fase (CPHA) do *clock*. Qualquer um dos dois parâmetros pode tomar o valor 0 ou 1, gerando assim os quatro modos diferentes. O CPOL é 1 quando a transmissão se dá no *falling edge* do *clock* e 0 quando a mesma é dada no *rising edge*. O CPHA toma o valor 1 quando a transição do *clock* é feita no início do bit e toma o valor 0 quando é feita a meio do bit. A figura 3.8 retrata na prática as quatro possibilidades de configuração descritas.

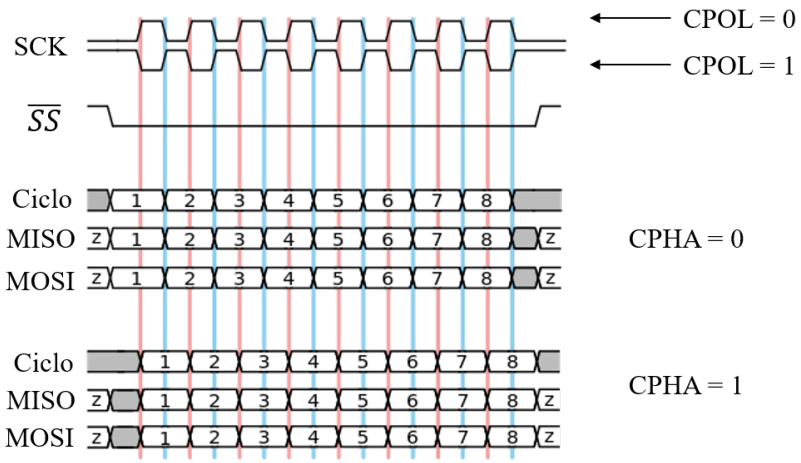


Figura 3.8: Modos de configuração
Fonte: *Digilent Blog* [32]

- **I²C** descreve o funcionamento de um barramento que pode ser dividido em duas linhas, SDA (responsável pela troca de informação) e SCL (garante o sincronismo da comunicação). Tal como SPI o alcance de comunicação é baixo (cerca de 1 metro) e uma vez mais, o tipo de interação é Mestre-escravo (podendo neste caso haver múltiplos mestres e escravos). Cada dispositivo I²C possui um endereço identificativo, habitualmente composto por sete bits. Antes de se iniciar qualquer comunicação, ambas as linhas de comunicação apresentam o sinal num nível lógico alto. Através do mestre, o valor de SDA passa para o nível baixo, dando inicio à comunicação. O primeiro dado a ser transmitido é o endereço do dispositivo escravo com quem pretende comunicar. A escrita da informação é feita através dos impulsos dados em SCL, sendo que cada um corresponde a um bit.

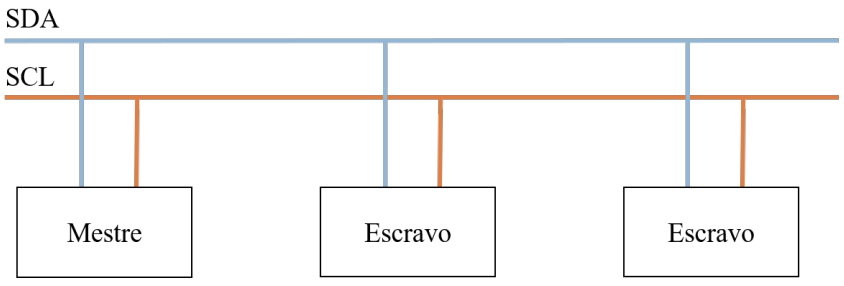


Figura 3.9: I²C
Fonte: Adaptado de *Vida de Silício* [33]

Na perspetiva de uma arquitetura em rede com múltiplos nós, existem outro tipo de comunicações cabladas que podem ser utilizadas, nomeadamente:

- **Ethernet** é hoje em dia a forma mais habitual de conectar vários dispositivos em rede. Engloba um conjunto de tecnologias que são normalmente utilizados em redes LAN ou

MAN e opera num mecanismo de CSMA/CD no acesso ao meio. Ethernet oferece grandes velocidades de comunicação e apesar de ter o alcance como uma limitação, desde que foi criada em 1970, as distâncias que consegue atingir têm vindo a aumentar ao longo do tempo (recorrendo a dispositivos repetidores e à utilização de fibra ótica em detrimento de cabos coaxiais ou de fios traçados).

- **FTTH** é uma tecnologia muito recente que permite que várias residências consigam receber serviços de internet ou televisão através de fibra ótica proveniente de uma cabine de operadora de telecomunicações. A fibra ótica proporciona uma comunicação muito rápida, eficiente e segura, contudo obriga a que seja feito um grande esforço financeiro para a sua instalação. FTTH distingue-se da sua versão anterior, a tecnologia FTTC, que apenas permitia a utilização de fibra ótica desde o fornecedor até às cabines de rua, passando nesse ponto a usar cabos de cobre para que a informação chegasse às habitações.
- **PLC** aproveita a existência de uma vasta rede já implementada no mundo, denominada rede elétrica, para transmitir informação. O conceito simplificado consiste na circulação de dados correspondentes a uma comunicação, no mesmo meio onde circula a energia elétrica, não necessitando assim de construir uma infra-estrutura própria. Esta tecnologia apresenta ainda, entre outras vantagens, o facto de qualquer local onde circule energia poder ser um potencial ponto de rede, apresentar taxas de transmissão elevadas (funcionando em várias frequências) e apresentar um alto grau de segurança na comunicação. Porém, devido à partilha do mesmo meio com a rede elétrica, esta poderá ser responsável por interferências nas transmissões. A comunicação é realizada em modo *Half-Duplex*.

3.11.2 Comunicações *wireless*

Uma vez que, tal como já referido, atualmente é praticamente impossível detetar colisões em comunicações *wireless*, as redes sem fios utilizam o CSMA/CA como método de acesso ao meio e operam em modo *Half-Duplex*. Relativamente ao modelo OSI, implementam apenas as duas camadas mais baixas, ou seja, a camada física e a camada de ligação de dados. Já existem inúmeras alternativas de comunicações *wireless* e como as opções de aplicabilidade no mundo atual são cada vez maiores (principalmente ao nível de *Smart Cities*), o mercado destas tecnologias irá continuar a crescer. Dar-se-á proeminência a algumas soluções de comunicação sem fios, entre elas:

- **Bluetooth** é um protocolo de comunicação enquadrado na norma IEEE 802.15.1, que apresenta caraterísticas de curto alcance (normalmente 10 metros, mas podendo chegar a 100 metros) e de baixo consumo de energia (2.5 mW para um alcance de 10 metros e 100 mW para distâncias de 100 metros). Tendencialmente inserido em redes do tipo PAN ou WPAN, não necessita de uma licença de comunicação e interliga dispositivos como computadores, tablets ou telemóveis. Esta tecnologia utiliza sistemas de comunicação rádio (com acessórios de baixo custo), funcionando a uma frequência de 2.4 GHz. Como outros tipos de comunicações também operam na gama de 2.4 GHz, Bluetooth evita que ocorram interferências através do refrescamento da frequência 1600 vezes por segundo entre 79 intervalos

de frequência de 1 MHz [34]. A aplicação deste tipo de comunicação é relativamente simples, dado que os dispositivos em rede não necessitam de qualquer tipo de permissão ou configuração de endereços. Mais recentemente, foi lançada a Bluetooth Low Energy, que apesar de manter os mesmos valores de alcance, apresenta consumos de energia menores.

- **Wi-Fi** é um conjunto de especificações baseados na norma IEEE 802.11, habitualmente inseridos em redes WLAN. Ainda que seja a comunicação sem fios mais fácil de encontrar, apresenta versões da norma que variam consoante a localização geográfica. De todas, as especificações 802.11.a, .b e .g são as alternativas mais comuns, sendo que estas apresentam diferentes valores de velocidade de transmissão, potência consumida e frequência de operação (a primeira funciona a 5 GHz e apenas na América, enquanto as últimas duas atuam a 2.4 GHZ e são utilizadas na Europa e na Ásia). Em comparação com Bluetooth, Wi-Fi apresenta maiores taxas de transmissão de dados (cerca de 22 Mbits/s, bem mais do que os habituais 3 Mbits/s oferecidos pela tecnologia Bluetooth) e valores de alcance relativamente semelhantes, todavia manifesta desvantagens ao nível do consumo energético e dos custos de instalação. As duas tecnologias diferenciam-se ainda do tipo de multiplexagem utilizada (Wi-Fi usufrui da multiplexagem por frequência, enquanto Bluetooth recorre ao tipo de multiplexagem temporal). Wi-Fi também pode operar sem precisar de licença.
- **GSM** e **GPRS** são exemplos de redes de telefonia móvel celular. GSM faz parte da segunda geração de tecnologias desta rede (já existindo redes 3G, 4G e as redes 5G estão cada vez mais próximas de chegar ao mercado), não obstante, é ainda hoje a tecnologia de redes móveis mais utilizada. De entre as suas caraterísticas, distingue-se uma grande capacidade alcance (cerca de 50 Km), um elevado consumo e um baixo custo de implementação e manutenção. GSM opera em dois conjuntos de frequências na gama dos 900 MHz (890-915 MHz e 935-960 MHz) e a gestão das frequências é feita através da combinação de mecanismos de TDMA e FDMA. GPRS é uma tecnologia de 2,5G, que tem vindo aos poucos a substituir a comunicação GSM devido à capacidade de enviar a informação por pacotes, garantindo maiores taxas de transmissão (40 kbits/s, valores superiores aos 14.4 kbits/s oferecidos por GSM).
- **ZigBee** é uma especificação para um conjunto de protocolos de comunicação criada para redes *wireless* baseadas em sensores e sistemas embarcados. Recorrendo a pequenos rádios digitais de baixa potência (e consequentemente baixo consumo) que apresentam rapidez na ligação à rede e baixa latência, ZigBee permite comunicações fiáveis, tipicamente utilizadas em sistemas que requerem baixo fluxo de dados (250 kbits/s) e uma curta vida útil das baterias. ZigBee opera a uma frequência de 2.4 GHz em todo o mundo (a mais utilizada), funcionando também nos EUA e Austrália a 915 MHz, na Europa a 868 MHz e na China a 784 MHz. A 2.4 GHz, esta tecnologia recorre a uma modulação do tipo OQPSK (que corresponde a uma variação de PSK utilizando quatro valores de fase para transmitir) e nas outras frequências, emprega uma modulação BPSK. Baseada na norma IEEE 802.15.4, esta tecnologia utilizada em redes WPAN, apesar de atuar a curtas distâncias (habitualmente 10

a 100 metros, ainda que, hoje em dia, alguns módulos de comunicação já consigam atingir distâncias de 1 a 3 Km), desfruta da funcionalidade *multi-hop* (capacidade de um ou mais nós, dentro de uma rede, funcionarem como repetidores, possibilitando um aumento do alcance dessa mesma rede). ZigBee pode representar-se como uma interação ponto-a-ponto ou então numa representação em rede com topologia em malha, árvore ou estrela. Numa rede deste tipo de comunicação, cada nó pode estar no estado ativo (quando está pronto a enviar/receber dados) ou no estado *sleep* (evitando assim gastos energéticos quando não está a transmitir) e deverá ser configurado consoante uma de três opções: Coordenador (ZC), Router (ZR) ou Dispositivo final (ZED). O ZC é o elemento principal e de presença obrigatória em qualquer rede (apenas pode existir um). Responsável por iniciar e gerir a rede, nunca pode estar em modo *sleep*. Sendo de existência opcional (consoante a topologia), ZR funciona como intermediário entre o coordenador e outros dispositivos finais, permitindo aumentar o número de nós na rede e o alcance da mesma. Podendo existir vários ZR's numa rede, qualquer um destes tem sempre de estar no modo ativo. O ZED apenas pode estar conectado a nós ZC ou ZR, o que significa que não pode receber dados de outros nós ZED, permitindo que estes possam estar em modo *sleep*. A figura 3.10 mostra tanto as topologias possíveis como as configurações dos nós.

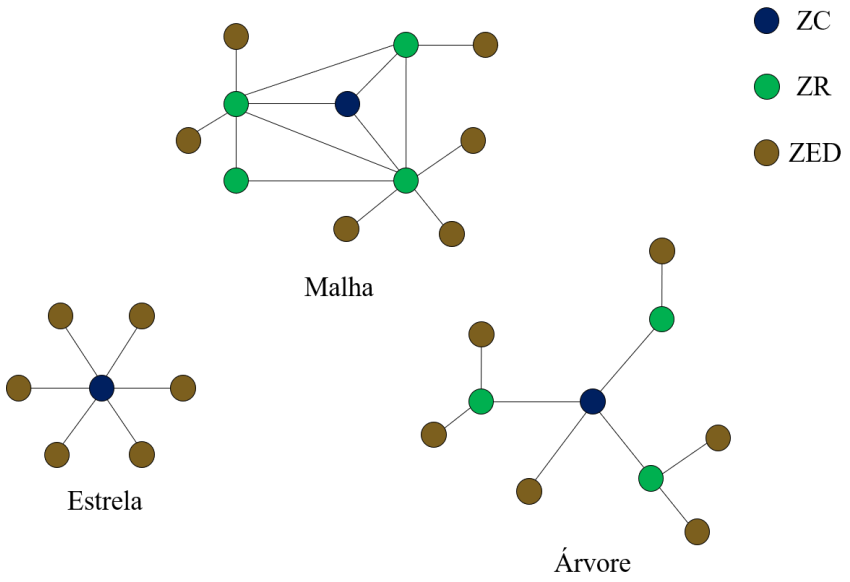


Figura 3.10: Topologias e configurações ZigBee
Fonte: Elaborado pelo autor

- **LoRa** é uma das tecnologias mais recentes, tendo sido anunciada pela primeira vez em 2015 pela empresa Semtech. O acrónimo LoRa provém de *Long Range* porque de facto esta comunicação apresenta como principal característica o potencial para comunicar a longas distâncias (3 a 4 km em locais urbanos e mais de 10 km em zonas rurais). A comunicação apresenta não só um grande alcance, como uma capacidade de o fazer, garantindo

uma transmissão robusta, eficiente e de muito baixo consumo. Dispositivos LoRa operam a frequências de 433 MHz ou 2.4 GHz no mundo inteiro e ainda a 868 MHz na Europa, a 915 MHz na Austrália e na América do Norte e a 923 MHz na Ásia. Este tipo de comunicação insere-se em redes LPWAN (redes WAN de ampla área e baixo consumo) com topologia em estrela (mais habitual) ou em malha, podendo utilizar uma modulação FSK ou CSS (técnica de modulação de uma onda sinusoidal através de variações da frequência ao longo do tempo). LoRa, sendo uma tecnologia de radio frequência sem fios e de longo alcance, foi desenvolvida especialmente para ser aplicada em sistemas IoT ou M2M (sistemas que apresentam uma estrutura semelhante a sistemas IoT mas que na sua gestão, não necessitam de interferência humana). Relembrando o modelo OSI, LoRa é implementado na camada física. Nas camadas de cima, entre outros protocolos já existentes, destaca-se o LoRaWAN, protocolo esse utilizado na camada de rede que procura gerir a comunicação entre *gateways* e dispositivos finais (formando um padrão de comunicação, dado que nem todos os dispositivos finais são produzidos pela mesma empresa) e garantir que sejam feitas transmissões de qualidade e em segurança. Muito recentemente, foi anunciado [35] que LoRaWAN passará também a operar a 2.4 GHz (como tecnologias como Bluetooth ou Wi-Fi). Na configuração de módulos de comunicação LoRa destacam-se três propriedades:

- Fator de Espalhamento (SF - *Spreading Factor*), que pode tomar um entre seis valores (SF pode ser igual a 7, 8, 9, 10, 11 ou 12). Este critério tem influência no tempo que o sinal se encontra no ar e na resiliência do sinal ao ruído (maiores valores de SF correspondem a mais tempo no ar e a maior resiliência do sinal);
- Largura de Banda (BW - *Bandwidth*), pode ser configurada como sendo 125, 250 ou 500 kHz. Quanto maior o valor de BW, maior será a taxas de dados, contudo este aumento faz diminuir o alcance da comunicação e contribui para um maior congestionamento na rede;
- Taxa de código (CR - *Coding Rate*), podendo ser atribuído um valor entre 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8, este parâmetro está relacionado com a resistência a ruídos;

Estas três propriedades encontram-se relacionadas através da influência que têm na taxa de transmissão de dados (R_b), através da fórmula:

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * CR \qquad (bits/s) \tag{3.1}$$

A arquitetura de uma rede LoRa (exibida na figura 3.11 através de uma topologia em estrela) é constituída por:

- Dispositivos Finais (sensores, atuadores, entre outros);
- *Gateways* (responsáveis por receber os sinais enviados pelos dispositivos finais e encaminhá-los para a internet);

– Servidores de rede (incumbidos de receber os dados das *gateways* e fazer a sua gestão e armazenamento);

– Servidores de aplicação (têm a função de disponibilizar os dados ao cliente);

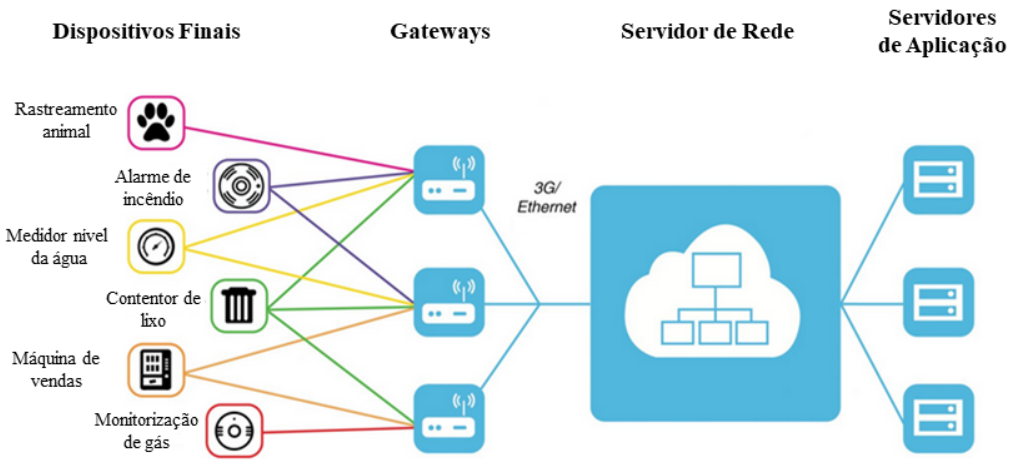


Figura 3.11: Arquitetura LoRa

Fonte: Adaptado de 3GLTEinfo [36]

- **NB-IoT**, é de todas as citadas, a tecnologia mais recente, tendo sido criada apenas em 2017 pela $_3$GPP (organização tecnológica criada com o objetivo de padronizar as mais variadas comunicações móveis). Tal como LoRa, este protocolo de comunicação, por ser de longo alcance e baixo consumo, encontra-se igualmente inserido em redes LPWAN. Em comparação com a tecnologia anterior, NB-IoT necessita de uma licença estabelecida por operadores de redes móveis, não pode ser implementada por qualquer pessoa, não carece da utilização de *gateways*, funciona melhor em ambientes fechados, contém taxas de dados mais elevadas (cerca de 250 kbit/s, enquanto LoRa apenas transmite a velocidades entre 0.3 e 50 kbits/s), tem tempos de latência maiores e tempos de vida das baterias menores, e apesar da ausência de *gateways*, obriga a custos de implementação superiores. Embora NB-IoT, tal como o nome indica, também tenha sido criada para lidar com sistemas IoT e apesar de hodiernamente ser muita a discussão sobre qual das duas tecnologias irá vingar mais, a verdade é que analisando as caraterísticas já mencionadas de LoRa e NB-IoT, verifica-se que as áreas de aplicação de cada uma poderão diferir ligeiramente. Apesar de atualmente ainda apresentar muito poucas opções de mercado, prevê-se que NB-IoT venha a crescer bastante e muito rapidamente nos próximos anos, devido à intensificação da procura.
- **SigFox** é, para além do nome da empresa proprietária, o nome de um outro protocolo de comunicação baseado em redes LPWAN. Assim como em NB-IoT, a tecnologia SigFox, não pode ser implementada por qualquer pessoa, contudo é de todas as comunicações mencionadas de baixo consumo e vasto alcance, a mais básica e a que apresenta custos, relativos aos módulos de comunicação, mais baixos. Opera a uma frequência de 868 MHz na Europa e a

902 MHz nos EUA e recorre a variações do mecanismo de modulação FSK. SigFox, utiliza frequentemente uma topologia em estrela (semelhante a LoRa) e apresenta como principais caraterísticas, o facto de não conseguir transmitir muita informação de cada vez, funcionar a velocidades de transmissão constantes e mais baixas do que as de LoRa e NB-IoT, não sofrer praticamente nenhuma colisão, e ter a capacidade de alcançar áreas subterrâneas. Ainda que SigFox seja a mais recente (2010) das três tecnologias baseadas em redes LPWAN referidas, é a que tem tido maior dificuldade em expandir-se no mercado.

Capítulo 4

Estado da arte de sistemas e soluções atuais de gestão da IP

4.1 Análise de sistemas propostos

O capítulo de Estado de arte encontra-se dividido em dois grupos com objetivos diferentes: a análise de sistemas propostos e a análise de mercado. Neste primeiro grupo, são analisados alguns relatórios que abordam o mesmo problema envolvido nesta tese e a correspondente solução adotada por cada um. Esta procura e reconhecimento dos procedimentos e tecnologias aplicadas em cada artigo, permite por um lado, evidenciar as diferentes caraterísticas do sistema que irá ser proposto no capítulo seguinte desta dissertação, e por outro, apreender o leque de alternativas concebidas para este tema.

A este ponto já é sabida a importância que a IP terá nas implementações de sistemas IoT, sendo que o relatório de mercado apresentado em 2019 pela empresa Northeast Group afirma mesmo que a IP inteligente representa mesmo o primeiro grande *use case* em *Smart Cities* [37]. Nesse sentido, a esquematização de uma possível solução exprime a seguinte estrutura:

- Problema: Pelo mundo fora existem milhões de luminárias de rua ligadas toda a noite, à potência máxima, mesmo quando por perto não passa nenhum veículo, nem nenhum peão. Esta utilização desnecessária das luminárias, contribui para uma percentagem significativa de gastos financeiros e energéticos.
- Solução: Construção de uma estratégia de gestão da IP, convergida num sistema IoT.
- Requerimentos obrigatórios: Presença de sensores e utilização de luminárias/lâmpadas LED.

Assente nestes três parâmetros têm sido propostas algumas abordagens ao problema, as quais serão nesta fase citadas.

4.1.1 Sistema de geolocalização para gestão da IP

"An energy efficient pedestrian aware Smart Street Lighting system" [38] é o título de um artigo publicado em 2011 que apresenta uma abordagem ao problema baseada em geolocalização, de forma a identificar o local de presença de cada peão. O seu principio base consiste na captação do sinal de GPS emitido pelo dispositivo móvel de cada cidadão de modo a que, através da sua localização, um servidor de rede consiga enviar comandos de ligar e desligar (ou regular) a luminária de rua quando necessário (devidamente exemplificado na figura 4.1).

O método adotado de forma a garantir uma geolocalização eficiente, consistiu na utilização de uma zona circular à volta de cada utilizador e de cada luminária, de modo a que quando o utilizador entra na zona da luminária, a lâmpada vá acendendo gradualmente e vá diminuindo a intensidade aquando da saída do utilizador dessa zona. O sistema enunciado optou por escolher uma comunicação *wireless* ZigBee entre as várias luminárias e uma comunicação Ethernet entre a *gateway* e o servidor de rede, sendo a rede constituída por:

- **Dispositivos finais**. Representados pelos *smartphones* como sendo os aparelhos capazes de utilizar o GPS para detetar a necessidade de alterar a intensidade da luminária.
- **Servidor de rede**. Responsável por controlar o sistema através do envio das mensagens de regulação da luz a emitir consoante as indicações recebidas dos dispositivos finais (indicam o instante de deteção de presença e o correspondente local, de forma a que saiba a luminária específica que terá de ser regulada). É ainda encarregue de gerir a base de dados que contém a configuração de cada lâmpada.
- **Módulos de comunicação em cada luminária**. Em cada luminária existem módulos ZigBee capazes de comunicar entre si (de forma a interligar os postes de iluminação), e apesar de não ser explícito no artigo, tendo em conta o que foi visto no capítulo anterior, pode assumir-se que estes aparelhos devem ser configurados como sendo routers, ou seja, ZR's.
- **Módulo de comunicação intermédio numa das luminárias**. Uma e apenas uma luminária contém um nó ZigBee capaz, não só de comunicar com os outros nós presentes nas luminárias, como ainda de comunicar com o servidor de rede, funcionando assim de intermediário (*gateway*). É este módulo que recebe os sinais do servidor de rede e os envia para os módulos ZR, tendo obrigatoriamente de ser configurado como coordenador (ZC).
- **Servidor de aplicação**. Corresponde a uma aplicação que pode ser acedida por qualquer usuário a partir do seu telemóvel. A mesma, apresenta duas vertentes: utilizador normal e administrador. Sendo um utilizador normal, a aplicação pode servir para aumentar a área da zona de iluminação, aumentando assim o grau de segurança em certas zonas. Após uma validação de uma chave de segurança, em modo administrador, pode ser feita a adição, remoção ou configuração de luminárias.

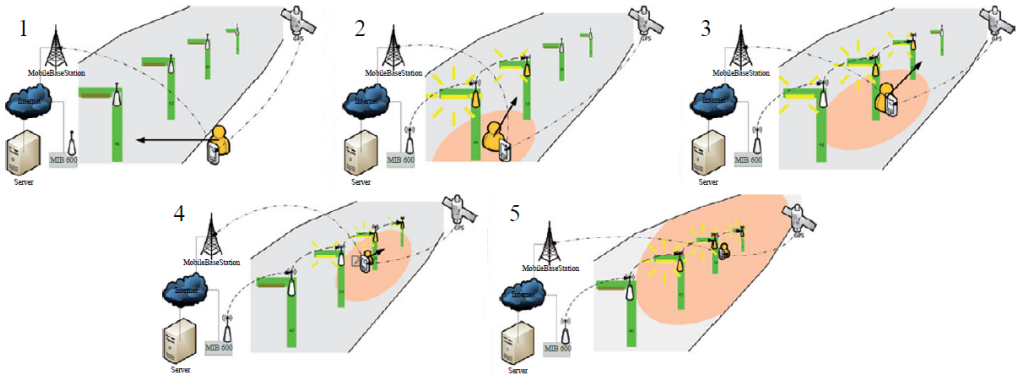


Figura 4.1: Funcionamento da estratégia apresentada

Fonte: Adaptado do artigo publicado por Reinhard Müllner and Andreas Riener (2011) [38]

Esta estratégia apresenta como principais vantagens, a capacidade de, em tempo real, conseguir dar resposta às necessidades de maior segurança nas ruas (através do aumento da zona de iluminação), e a salvaguarda de anonimato relativamente à informação recolhida em cada *smartphone* e à garantia de que essa informação é rapidamente eliminada (sem ser guardado um histórico).

Em contrapartida, esta solução expressa alguns inconvenientes, com particular destaque para a obrigatoriedade do peão ter que ter um telemóvel consigo. Ainda que o parâmetro da privacidade ter sido mencionado como um benefício, é também visto como uma desvantagem pois obriga a que sejam recolhidas informações pessoais, opção essa que (independentemente das garantias de segurança) não é bem aceite por todos. Por último, o relatório, nos seus resultados, indica que certos objetos como árvores ou edifícios podem provocar interferências na comunicação, impedindo que o sistema funcione sempre como deveria. Em relação a este aspeto final, é de salientar que este relatório foi escrito em 2010, sendo que desde então foram lançados novos modelos de comunicação ZigBee, capazes de oferecer potências de transmissão melhores, e transferências mais robustas e entre maiores distâncias.

4.1.2 Sistema de deteção de presença para a gestão da IP

Em 2013 foi publicado um outro artigo [1] onde foi proposta uma outra solução com diferentes caraterísticas. Recorreu-se uma vez mais à tecnologia ZigBee, no entanto neste caso, a deteção de presença humana foi feita, não através de GPS, mas sim através de sensores de presença instalados em vários nós. São apresentadas as seguintes alternativas de dispositivos finais:

- **Unidade lâmpada**. Inserida na lâmpada de cada luminária encontra-se um sistema de controlo ligado a sensores de presença e movimento e a um módulo de comunicação ZigBee.

- **Unidade sensor**. Conjunto constituído por um controlador associado a apenas um sensor de presença e um módulo de comunicação ZigBee. Poderá ser colocado em qualquer opção válida (como por exemplo numa parede de um prédio ou num poste elétrico).

- **Ponto de acesso**. Conjunto em que o controlador apenas se encontra interligado a módulo de comunicação, pode ser acoplado em sítios semelhantes aos de Unidade sensor, servindo para expandir a rede, permitindo que o sinal chegue a luminárias mais longínquas.

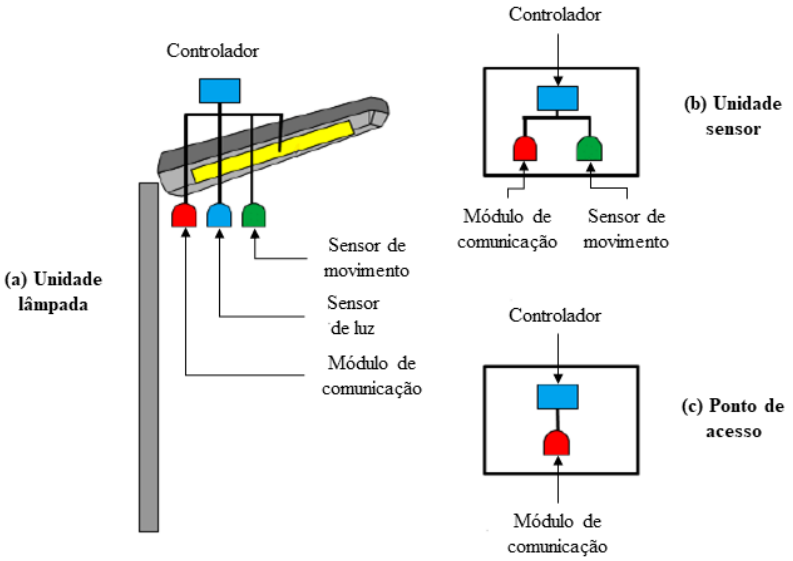


Figura 4.2: Componentes do sistema abordado

Fonte: Adaptado do artigo publicado por M. Novicky e R. Martinez (2008) [1]

As luminárias funcionam de forma a que, através dos sensores de luz, estas acendam quando está de noite e desliguem quando está de dia. Quem desenvolveu este artigo, definiu que o objetivo principal consistia em garantir que as luzes estivessem acesas antes de qualquer peão ou veículo entrar na rua correspondente (ou seja, antes de conseguirem ver as luminárias). Para conseguir isso, tornar-se-ia necessário que os diferentes componentes do sistema pudessem comunicar entre si para enviar a informação de que houve uma deteção de presença.

Este relatório salientou ainda que a implementação prática do sistema em rede poderia ser realizada de duas maneiras diferentes, através de um controlo centralizado ou de um controlo distribuído. Num sistema de controlo centralizado (baseado em redes com topologia em árvore), os componentes (a) e (b) da figura 4.2 (por conterem um sensor de presença) deverão enviar a informação de deteção de presença para uma unidade central (terá de ser um nó ZC, que poderá ou não estar ligado a um servidor de rede). Esta unidade, ao ler a informação, deverá perceber que nós é que detetaram a passagem de movimento, de forma a enviar informação para os múltiplos nós sobre quais as luminárias que deverão ser acendidas tendo em conta os objetivos pretendidos. Este sistema apresenta como principal problema, a desvantagem de uma topologia em árvore, ou seja, a dependência do nó principal. Associado a uma topologia em malha, um sistema de controlo distribuído permite que através da comunicação entre nós, as lâmpadas possam ser ligadas aquando da receção de mensagens de outros nós, os quais ou detetaram a presença de movimento ou receberam essa mesma informação proveniente de outros nós.

Para finalizar, o artigo foca ainda um aspeto relativo ao instante adequado a que as luzes se desliguem estando de noite. Apresentando duas possíveis abordagens (ou através de um intervalo temporal ou através da não deteção de movimento por nenhum dos sensores), considera-se que nenhuma é indubitavelmente fiável de funcionar sempre.

4.1.3 Sistema de identificação da distância para a gestão da IP

Por último, foi lançado um artigo em 2015 [39], onde se propôs a solução ousada de implementar um sistema *TALiSMaN* (Traffic-Aware Lighting Scheme Management Network), que na tradução linear em português significa, rede de gestão de esquemas de iluminação com reconhecimento livre.

Esta abordagem incide na instalação de uma rede *Mesh* descentralizada, ou seja, assumindo um controlo distribuído, cujo sistema opera continuamente através de dispositivos de curto alcance. A estratégia usa o principio de comunicação entre luminárias associado à instalação e utilização de sensores de presença em cada poste de iluminação, gerando-se uma rede *wireless* de sensores (não especificando, porém, qual o protocolo de comunicação mais viável de usar). A cada sensor cabe a função, não só de detetar peões/veículos, mas sim de reconhecer a distância a que os mesmo se encontram. Através dos valores recolhidos, a rede funciona de tal forma que a aproximação de um peão/veículo à luminária A, cuja lâmpada já se encontra com a luminosidade no máximo ou quase no máximo, faz com que esta vá enviando informações à luminária B para ir acendendo, que por sua vez envia informações à luminária C e assim sucessivamente. Na prática a intensidade das lâmpadas seguintes aos peões/veículos vai aumentando à medida que estes se vão aproximando e a intensidade das lâmpadas anteriores a estes, vai diminuindo à medida que estes se vão afastando. Este principio é demonstrado na figura 4.3, onde cada valor de s representa uma luminária). Para executar este modelo, os autores do artigo verificaram, através de fórmulas matemáticas, a quantidade necessária de luz necessária ao longo de diferentes distâncias, segundo a perspectiva de um veículo e de um peão.

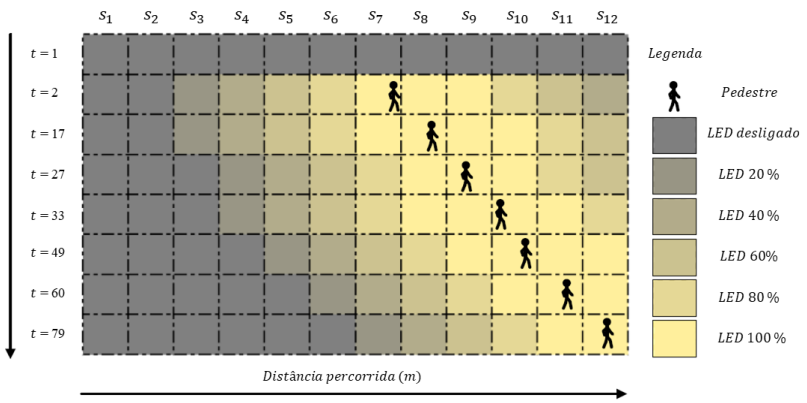


Figura 4.3: Ilustração do funcionamento do TALiSMaN

Fonte: Adaptado do artigo publicado por Alex S. Weddell Neil M. White Sei Ping Lau, Geoff V. Merrett (2015) [39]

4.2 Análise de mercado

No âmbito das questões já mencionadas anteriormente que levam à procura de um sistema que seja capaz de gerir a iluminação pública de modo inteligente e sustentável, torna-se essencial realizar um estudo sobre as várias alternativas que vão de encontro às soluções a curto, médio e longo prazo que existem no mercado, analisar as caraterísticas de cada uma e fazer uma comparação entre elas. Esta pesquisa visa essencialmente perceber qual o rumo que algumas empresas da área de IP estão a tomar na construção dos seus recursos, de modo a que o sistema de controlo das luminárias que irá ser proposto nesta dissertação, vá de encontro não só às ideias implementadas pela Pavnext, como também às opções de mercado.

4.2.1 Siemens

Seguindo uma linha de pensamento baseada em *"Light by demand, not by the clock"*, a Siemens apresenta no seu portfólio, criado para a IP inteligente [40], uma opção que recorre ao uso de cabines para comunicar, tanto com luminárias LED, como também com um centro de controlo (VIA LUMEN – nome atribuído ao sistema de gestão da Siemens), tal como mostra a figura 4.4. A solução de mercado oferecida pela empresa promove a utilização de sensores crepusculares nas suas cabines, garantindo que os valores relativos à luz ambiente sejam continuamente lidos e enviados de forma síncrona para o centro de controlo, a partir de onde pode ser realizada a gestão da iluminação. Em caso de alguma falha na comunicação entre a cabine e o centro de controlo, é garantida uma iluminação adequada à altura do ano, através do uso de relógios astronómicos. A Siemens, por meio da *Sitraffic® Concert Traffic Control Center* (centro de gestão do tráfego rodoviário, criado pela empresa), implementa na sua solução de sistema a capacidade de diminuir as percentagens de luz emitidas quando são detetados poucos veículos nas estradas e vice-versa. Neste portfólio, a Siemens especifica que a comunicação entre o centro de controlo e a cabine pode ser feita através de GPRS/GSM ou por Ethernet/Fibra ótica, não especificando porém como é realizada a comunicação entre a cabine e a luminária (contudo, tendo em conta a forma como o sistema foi descrito, pressupõe-se que essa comunicação seja obtida através de PLC).

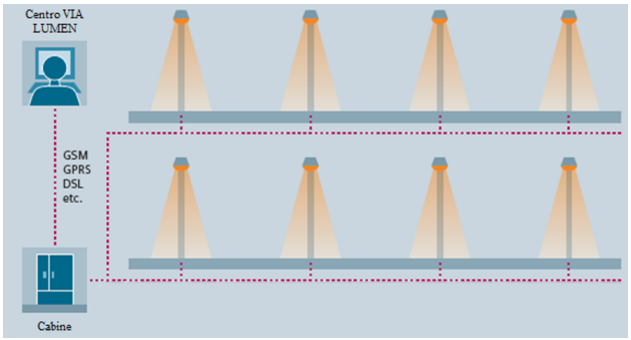


Figura 4.4: Arquitetura de comunicações baseada em cabines

Fonte: Siemens [40]

4.2.2 Novalume/Lumintell

A Novalume (nome atribuído pela Lumintell à sua solução de iluminação integrada em *Smart Cities*) tem no mercado duas opções de conexão entre luminárias [41]. A primeira alternativa prende-se com a instalação de luminárias Lumintell próprias (figura 4.5) que são constituídas por um sistema embebido com a presença de uma antena capaz de comunicar via *wireless* (através de protocolos de comunicação LoRa, ZigBee e futuramente 5G) com um centro de controlo criado pela empresa. A partir deste centro, a Lumintell oferece a possibilidade de monitorizar e gerir toda a informação recolhida pelos sensores acoplados às luminárias (estes podem ser de variados tipos: presença, qualidade do ar, temperatura, etc.) através de um *dashboard* no seu site oficial, que permite o envio de comandos de controlo às luminárias de modo a que estas possam regular a intensidade da luz. As luminárias podem estar configuradas apenas para receber/enviar informação de/para outras luminárias ou podem ser escolhidas como sendo as responsáveis por comunicar com o centro de controlo (funcionando como uma *gateway*). Relativamente à solução oferecida pela Siemens, esta estratégia não usa, nem necessita de nenhuma forma de conexão que utilize cabines ou comunicações por via de cabos cablados.



Figura 4.5: Luminárias Lumintell
Fonte: Novalume/Lumintell [41]

Numa segunda alternativa, a Lumintell oferece a possibilidade de acoplar às luminárias já existentes (com lâmpadas LED), um kit conector. Este dispositivo *plug-and-play* é colocado no topo do poste de iluminação (figura 4.6), montado num NEMA *socket* (estrutura elétrica e mecânica que permite a comunicação ente a luminária e o centro de controlo). Para luminárias que não contenham NEMA *socket*, a Lumintell fornece a possibilidade de uso de um adaptador colocado no mastro da luminária. Após a instalação do dispositivo *plug-and-play* ou do adaptador mencionado, a luminária comporta-se do mesmo modo que a primeira alternativa.



Figura 4.6: Kit conector Lumintell
Fonte: Novalume/Lumintell [41]

No seu portfólio [41], a empresa descreveu um exemplo prático em que instalou 27000 exemplares de luminárias próprias na cidade de Talca, Chile e verificou reduções de 66% de energia consumida e de 2227 toneladas de gases CO_2 emitidos anualmente, ressalvando os resultados extremamente positivos. Numa nota adicional, salienta-se a capacidade das luminárias em permitir o acesso a Wi-Fi público por parte de cada peão.

4.2.3 Lumenia

A Lumenia está no mercado com as suas próprias luminárias [42] (representadas na figura 4.7), que se destacam das apresentadas pela Lumintell pelo seu vasto leque de opções de sensorização (GPS, videovigilância, movimento, inclinação, luz ambiente, entre outros) capazes de integrar alternativas distintas de sistemas IoT.

A empresa oferece duas possibilidades de interação entre luminárias através de comunicações por radio frequência (admitindo a habilidade para utilizar diferentes protocolos, no entanto, não especificando publicamente quais) ou por cabo PLC. Utilizando qualquer umas das opções de comunicação, algumas das luminárias têm a capacidade de comunicar com uma cabine que funciona como *gateway* para fazer chegar a informação a um centro de controlo e monitorização. Esta última comunicação pode ser realizada por redes móveis/GPRS ou por Ethernet.



Figura 4.7: Luminárias Lumenia
Fonte: Lumenia [42]

4.2.4 Philips

A Philips, empresa holandesa de renome mundial, aparece no mercado da iluminação pública com várias formas de conexão das luminárias em rede (são ao todo quatro as alternativas que a empresa disponibiliza) [43].

À solução de iluminação integrada em *Smart Cities*, a empresa intitulou-a de CityTouch. A primeira das quatro opções obriga ao emprego de luminárias CityTouch (luminárias próprias) que

basta serem instaladas e automaticamente irão comunicar via Internet com um centro de monitorização (em tudo semelhante ao que empresas como a Lumintell e a Lumenia oferecem). Numa segunda alternativa, existem os kits conectores CityTouch que apenas necessitam de ser acoplados aos mastros de qualquer luminária existente (com lâmpadas LED), para automaticamente ficarem aptos para comunicar. Ambas as possibilidades estão demonstradas em 4.8.

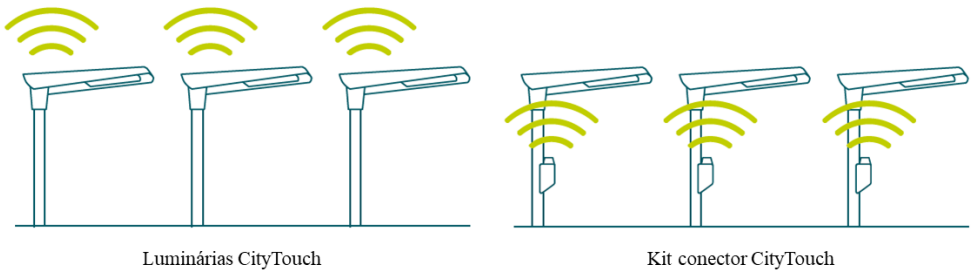


Figura 4.8: Formas de conexão baseadas em soluções CityTouch
Fonte: Philips [43]

As duas alternativas restantes estão relacionadas com o uso de segmentos de controlo (cabines). Numa das opções (lado esquerdo da figura 4.9, cada luminária comunica via radiofrequência com a cabine (uma vez mais sem especificar quais os protocolos aplicados) e na outra opção (lado direito da figura 4.9), a comunicação é feita por cabo PLC entre as diversas luminárias e a cabine. Em ambas as opções, o segmento de controlo comunica posteriormente via Internet com o centro de controlo.

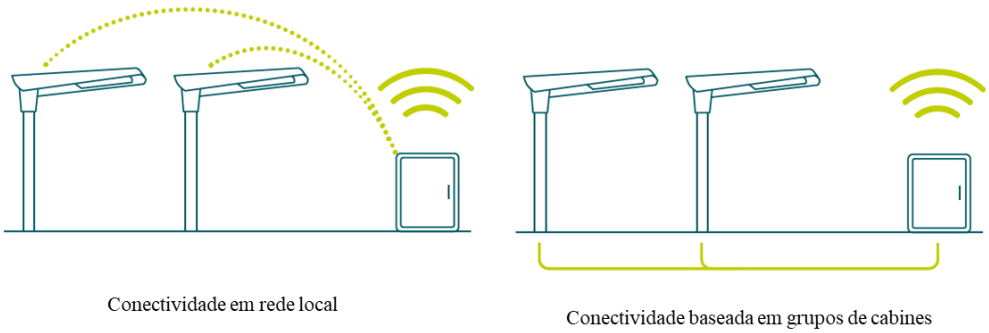


Figura 4.9: Formas de conexão com cabine
Fonte: Philips [43]

A empresa de tecnologia de iluminação desempenhou um caso de estudo [44] na Galiza, Espanha onde renovou 8600 postos de iluminação com lâmpadas LED. Desses 8600, 6500 eram controlados com CityTouch e os resultados foram altamente satisfatórios, revelando poupanças de energia na ordem dos 70%. Adicionalmente, a população constatou uma melhoria na qualidade de iluminação e revelou sentir uma maior sensação de segurança noturna, traduzindo-se numa redução do número de chamadas a indicar falhas na iluminação.

A Philips Lighting e a Vodafone formaram em 2016 uma parceria para a área das IoT's [45], com ênfase na área da iluminação pública. Esta colaboração interliga os dispositivos CityTouch da Philips com as funcionalidades da rede M2M da empresa de telecomunicações (instalando um cartão Vodafone em cada nó). Na noticia partilhada é realçada ainda a capacidade de poupança do sistema de regulação de iluminação (CityTouch) oferecido pela Philips, quantificando em percentagens de 30 a 40%, adicionais à poupança proporcionada pelo uso de lâmpadas LED.

4.2.5 Tvilight

Criada propositadamente para desenvolver soluções de IP inteligentes, a Tvilight é uma empresa fundada em 2013 e que atualmente, é de todas as analisadas, a que apresenta opções de mercado mais elaboradas e evoluídas [46].

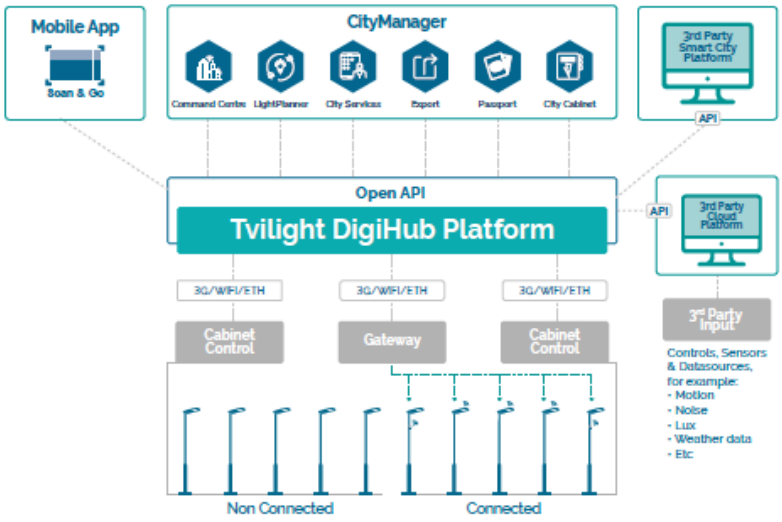


Figura 4.10: Arquitetura das redes Tvilight
Fonte: Tvilight [46]

A Tvilight não contém luminárias próprias no seu catálogo de mercado, direcionando o seu foco para a criação de diferentes kits conectores (distinguem-se tendo em conta o objetivo a que se propõem) que podem ser acoplados a qualquer luminária já existente, dos quais se destaca a opção mais completa designada por CitySense Plus. Este dispositivo contém sensores de presença que, juntamente com a capacidade de comunicação *wireless* que apresentam, permite que através da interação com as outras luminárias, seja feito um controlo da iluminação de forma inteligente e em tempo real, de modo a garantir que a luminária mais próxima do peão/veículo esteja sempre com a intensidade máxima e as restantes apresentem uma relação distância/intensidade inversamente proporcional. Está disponível uma outra opção de mercado, a Skylite Plus, a qual não possui a funcionalidade de deteção de presença, apenas permite que as luminárias comuniquem entre si por *wireless* (uma combinação Skylite Plus e CitySense Plus é possível e em alguns casos até viável). A empresa oferece duas formas diferentes de interação em rede: uma com topologia em malha,

baseada na norma IEEE 802.15.4, operando a 2.4 GHz (caraterísticas que se enquadram nas do protocolo ZigBee) e outra com topologia em estrela, recorrendo a uma comunicação NB-IoT. Em caso de existência de uma falha na comunicação, o sistema garante que as lâmpadas entrem em modo de segurança, funcionalidade executada devido à presença de um relógio RTC. A arquitetura das soluções apresentadas pela Tvilight encontra-se demonstrada em 4.10. A empresa abre a possibilidade de instalação de qualquer outro tipo de sensores para que seja feita uma monitorização dos dados de forma mais completa (o mesmo acontece com a Novalume ou a Philips).

A Tvilight contém no seu "currículo" vários casos reais onde as suas tecnologias integradas e os seus resultados analisados. A cidade de Jaipur, na Índia foi exemplo [46] da aplicação de kits CitySense Plus, cuja análise de resultados demonstrou uma poupança energética de cerca de 72%, associada a uma redução da emissão de gases poluentes e da redução de custos.

4.2.6 Síntese da estrutura de um sistema inteligente para IP

Após ter sido feita a análise de alguns sistemas propostos em artigos e de várias soluções de implementação que se situam no mercado, é importante sintetizar o que é necessário ter em conta aquando da criação ou escolha de uma estratégia de gestão da iluminação pública de forma inteligente.

Como é sabido, as redes *wireless* ligadas a aplicações IoT têm crescido nos últimos anos, com especial destaque para o setor da IP. O aparecimento das redes LPWAN tem sido visto como o futuro para este setor [47], tendo Portugal sido dos primeiros países no mundo a instalar a tecnologia LoRa numa das suas cidades (Tomar, Portugal [48]). Ainda assim, é uma certeza que as redes com esta especificação geográfica são sempre a melhor opção para a instalação de um sistema nesta área? É este tipo de questões que devem ser colocadas:

- Instalação de novas luminárias ou aproveitamento das já existentes?
- Redes com comunicações *wireless* ou através de fios cablados?
- Sendo *wireless*, deve ser escolhido um protocolo que permita comunicações de longo alcance ou um que apenas comunique a curtas distâncias?
- Sistema de controlo centralizado ou distribuído?
- Que tipo de sensores faz mais sentido utilizar? E devem ser instalados nas luminárias ou em segmentos individuais?
- Como é feito o controlo da iluminação?
- Qual o mecanismo para saber o instante de desligar/reduzir a intensidade da lâmpada?

A verdade é que muitas vezes o sistema escolhido depende de muitos fatores, nomeadamente, dimensão da cidade, proximidade dos postes de iluminação, cenário rodoviário, tráfego diário, tipo de instalações já existentes, entre outros. Todavia, salienta-se que o sistema mais robusto, é aquele que consegue abranger um maior número de cenários com fatores distintos.

Capítulo 5

Estudo teórico sobre o controlo da iluminação pública

Após uma pesquisa sobre o impacto da mudança de paradigma atual da IP para uma alternativa mais inteligente complementada pela tecnologia LED, pesquisa essa que incluiu a análise de casos de estudo como os que foram referidos no capítulo anterior (casos de [41], [45] e [46]), realizados pelas empresas mencionadas, chegou-se à conclusão que as percentagens de poupança de consumo energético e gastos financeiros se encontram na ordem dos 50% a 75%. Não obstante, na maior parte dos casos não está especificada a verdadeira contribuição do facto do sistema ser inteligente, pois estes valores de poupança incluem a mudança para lâmpadas LED (exceção feita ao caso de estudo apresentado pela Philips cujas percentagens de contribuição se encontram identificadas e mencionadas no capítulo anterior), sendo esse um dos objetivos deste capítulo. A variação de poupanças mencionada pode ainda ser superior porque cada cidade é diferente e tem necessidades distintas. Isto significa que, apesar da adoção de novas soluções, as percentagens de melhoria dependem, por um lado, dos consumos e gastos existentes antes da adoção, e por outro, das soluções escolhidas.

Este capítulo visa abordar diferentes cenários para um controlo de iluminação pública baseado no sistema de monitorização de dados Pavnext, de forma a perceber a contribuição de cada solução para a redução de consumos energéticos e, consequentemente, económicos. O tópico 5.1 carateriza a forma como este estudo será feito, definindo variáveis que serão comuns a todos os cenários. A implementação das diferentes soluções é abordada através dos cenários A e B, C, D, E, e F, descritos, respetivamente em 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. No tópico 5.7 é especificada a contribuição do sistema Pavnext, enquanto em 5.8 são dispostos e discutidos os resultados. Em 5.9 é ainda feita uma análise mais aprofundada sobre a influência de algumas variáveis nos resultados finais.

5.1 Caraterização do estudo

Idealizou-se um local como o que se encontra representado na figura 5.1 para a realização do estudo teórico. Ao longo da estrada de 240 metros, estão dispostas 5 luminárias de cada lado, após uma passadeira que se encontra junto a dois dispositivos NEXT-Road da Pavnext que permitem a redução de velocidade de veículos. A estrada é considerada de sentido único, com os veículos a deslocarem-se da esquerda para a direita. A presença ou ausência de sensores depende do cenário em questão. O estudo foi realizado ao longo de 24h, das quais 12h apresentaram as lâmpadas ligadas (horário de Verão - anoitece às 19h e amanhece às 7h). Segundo dados fornecidos pela Pavnext, cada veículo ligeiro é capaz de produzir até 10 Wh, dependendo da sua velocidade, por isso neste estudo, assume-se que cada carro que passa pelo pavimento irá produzir um valor médio desta energia, ou seja, 5 Wh. Para uma análise financeira, teve-se em conta o preço atual de venda de eletricidade à rede de 0.095€/kWh (segundo o Diário da República, 1.ª série — N.º 74 [49]) e o preço de compra da mesma por 0.12€/kWh (valor definido a partir da informação recolhida em [50]).

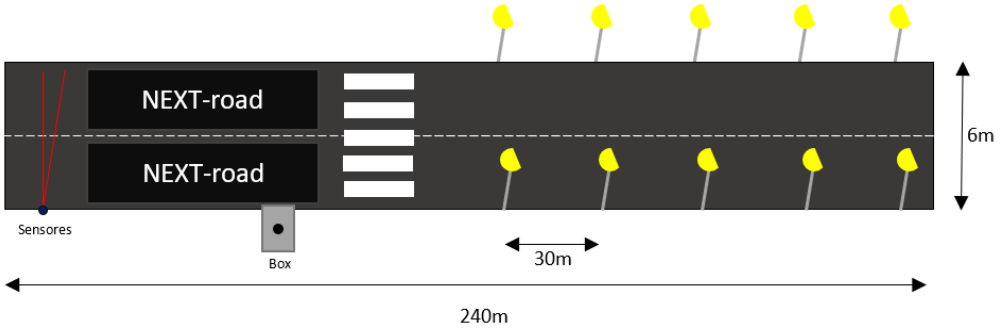


Figura 5.1: Maqueta do local de estudo

5.2 Cenários A e B - Mudança para lâmpadas LED

Atualmente, as lâmpadas mais utilizadas em luminárias de rua são as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (lâmpadas de descarga). É na alteração de lâmpadas descarga por LED, que se encontra a maior percentagem de poupança energética. Começando pelo exemplo mais básico e que representa a situação de maiores consumos energéticos, no cenário A (o pior cenário), a estrada é iluminada por lâmpadas de descarga iguais durante toda a noite (12 horas), emitindo uma percentagem de luminosidade constante de 100%. O cenário B, irá por sua vez representar a mesma situação vivida no cenário A, sendo a única alteração a substituição de todas as lâmpadas de descarga por lâmpadas LED iguais. De salientar que em ambos os cenários, os sensores não serão tidos em conta.

De forma a que a criação dos cenários de estudo fosse mais realista, procurando ir de encontro às escolhas adotadas na prática por um município, contactou-se a câmara municipal de Esposende,

cidade pertencente ao distrito de Braga, para saber que tipo de lâmpadas utilizam. Segundo as informações recolhidas, atualmente, a cidade do norte de Portugal apresenta lâmpadas de descarga com diferentes potências (70 W, 100 W, 150 W e 250 W), assim como, lâmpadas LED de categorias distintas (com potências de 26.1 W, 35.7 W, 36.2 W, 39.1 W e 53.5 W). Estes são os valores que irão ser tidos em conta daqui em diante.

Imaginando que na estrada do estudo, no cenário A, todas as luminárias eram constituídas por lâmpadas de descarga com potência de 250 W, e que no cenário B, a potência de lâmpadas LED era de 26.1 W, esta alteração corresponderia a uma poupança energética de cerca de 89.56%. Um valor altíssimo, numa situação que muito possivelmente não corresponderia a uma escolha real uma vez que no cenário A, as potências das lâmpadas eram muito altas, logo, haveria possivelmente uma maior necessidade de iluminação daquela zona, sendo que para o cenário B, ter-se-iam escolhido lâmpadas LED com maior potência. Se, pelo contrário, a potência das lâmpadas no cenário A fosse de 70 W e, no cenário B, de 53.5 W, a percentagem de poupança energética seria de 23.57%. A tabela 5.1 apresenta todas as possíveis combinações de valores de potência das lâmpadas utilizadas nos cenários A e B, e as correspondentes poupanças no consumo de energia no intervalo de tempo do estudo.

Tabela 5.1: Relação entre a potência das lâmpadas e a poupança energética

Pot. Lâmpada Cenário A (W)	Pot. Lâmpada Cenário B (W)	Poupança energética (%)
70	26.1	62.71
100	26.1	73.90
150	26.1	82,60
250	26.1	89.56
70	35.7	49.00
100	35.7	64.30
150	35.7	76.20
250	35.7	85.72
70	36.2	48.29
100	36.2	63.80
150	36.2	75.87
250	36.2	85,52
70	39.1	44,14
100	39.1	60.90
150	39.1	73.93
250	39.1	84.36
70	53.5	23.57
100	53.5	46.50
150	53.5	64.33
250	53.5	78.60

Analisando os diferentes valores obtidos na tabela 5.1, pode verificar-se que substituir lâmpadas de descarga com baixa, média e alta potência por lâmpadas LED com baixa, média e alta potência, respetivamente, conduz a poupanças energéticas que se encontram dentro do intervalo de percentagens já anunciado, ou seja, de 60% a 80%. De forma a que nos próximos tópicos seja pos-

sível comparar a influência de novas abordagens relativamente a estes cenários, escolheu-se uma potência para as lâmpadas dos cenários A e B. Para isso, observou-se qual o valor de poupança que se encontra mais perto da média de todos os resultados obtidos (ou seja, 66.69%), e atribuiu-se ao cenário A a lâmpada cuja potência é 150 W e ao cenário B, a lâmpada LED com potência de 53.5 W. De aqui em diante, em todos os cenários serão utilizadas lâmpadas LED. Relativamente a estes valores atribuídos, resta mencionar que o valor de poupança observado, obtém-se tendo em conta um consumo diário de 18 kWh no cenário A e 6.42 kWh no cenário B.

5.3 Cenário C - Introdução de sensores de luminosidade

Para além das condições apresentadas no cenário B, neste cenário tem-se também em conta a presença de sensores de luminosidade, que recolhem informação sobre a quantidade de luz exterior que existe e transmitem-na a todas as horas para um microcontrolador que irá realizar a gestão da percentagem de luz a emitir por cada luminária. Sendo que a informação é enviada todas as horas (num total de 12 horas), atribui-se a possibilidade de existirem 12 horários com diferentes percentagens de emissão. Como este estudo é teórico, supôs-se apenas quais os horários que teriam diferentes percentagens de luz exterior, tendo em conta, não apenas a luz solar, mas também a luz artificial proveniente de estabelecimentos ou de uma quantidade significativa de veículos. Sendo assim, a tabela 5.2 representa os horários definidos e as correspondentes percentagens de luminosidade que as lâmpadas emitem.

Tabela 5.2: Horários com diferentes percentagens de emissão de luz

	Início (h)	Fim (h)	Percentagem de luz emitida (%)
Horário 1	19	20	30
Horário 2	20	22	80
Horário 3	22	24	90
Horário 4	24	6	100
Horário 5	6	7	50

Através dos dados apresentados na tabela 5.2 calculou-se o consumo de energia de cada horário, com o propósito de obter o consumo total diário. O valor obtido, 5.46 kWh, é como se verifica, inferior aos valores obtidos nos cenários A e B, sendo que neste caso a percentagem de poupança de energia relativamente ao cenário A é de 69.68%.

5.4 Cenário D - Introdução de sensores de presença

De forma análoga ao que foi feito no cenário C, neste caso, introduziram-se sensores de presença de veículos ou peões (os sensores de luminosidade não são tidos em conta neste caso). Ao contrário do cenário anterior, existe apenas um horário (19h-7h) de 12 horas de duração, tendo-se definido que quando não é detetado nenhum veículo ou peão, as luminárias emitem apenas 70% de luz, ao contrário dos 100% de luz emitida quando o sensor de presença deteta.

Este cenário obriga ao emprego de mais variáveis, nomeadamente: o tempo que a lâmpada fica ligada quando passa um peão (TLig.ped) e esse mesmo tempo quando passa um veículo (TLig.vei), o intervalo de tempo de passagem de peões durante a noite (Tped) e ainda o mesmo intervalo de passagem de veículos (Tvei). As primeiras duas variáveis foram definidas com base na velocidade média de um peão - 1.3 m/s (valor médio entre 1.2-1.4m/s [51]) e na velocidade média de um veículo numa cidade - 50 km/h (valor estimado), de forma a perceber o tempo que ambos demorariam a percorrer 240 metros de distância. Relativamente às últimas duas variáveis, resultaram da média de um conjunto de horários que se encontram no tópico 5.5. Todos estes valores podem ser vistos na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Variáveis impostas no cenário D

TLig.ped	185 seg
TLig.vei	17 seg
Tped	18.947 min
Tvei	58 seg

Este cenário apresenta ainda outra condicionante que não tinha sido ainda exposta até ao momento. Durante o tempo de estudo, há momentos em que durante o intervalo de tempo em que as luzes se encontram a 100% devido à passagem de um peão, ocorre também a passagem de um veículo. Se o cálculo do consumo diário fosse calculado de forma similar à que foi feita nos cenários anteriores, ter-se-ia somado os consumos provocados pela passagem de peões e veículos, obtendo-se um valor superior ao suposto. Devido à complexidade dos cálculos, para resolver este problema, recorreu-se ao desenvolvimento de um *software* (retratado através de um fluxograma no anexo A) que indicasse exatamente o tempo em que as lâmpadas estão ligadas durante a ausência de peões/veículos. Com este tempo facilmente se consegue obter o consumo de energia de quando as lâmpadas estão a 70% e a 100%. O resultado do consumo diário neste cenário é de 5.10 kWh e provém da soma dos dois consumos mencionados. Este resultado coincide com uma poupança no consumo de energia de 71.65% relativamente ao pior cenário.

5.5 Cenário E - Diferentes horários de presença

O cenário D foi realizado numa perspetiva teórica de intervalos constantes de passagem de peões e veículos. No mundo real, como se sabe, isto não acontece. Durante as 24h do dia há momentos com maior afluência de veículos/peões do que noutros, assim como há estradas mais calmas e outras mais movimentadas. Para a construção dos dois próximos cenários, traçou-se uma estimativa de um conjunto de horários com diferentes intervalos de passagem de veículos/peões no espaço de uma hora, numa estrada mais tranquila e o mesmo para uma estrada menos tranquila. Esses horários encontram-se representados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Horários com diferentes percentagens de emissão de luz - Cenário C

	Estrada movimentada		Estrada calma	
Conjunto de horários	Intervalo de passagem de veículos (seg)	Intervalo de passagem de peões (min)	Intervalo de passagem de veículos (seg)	Intervalo de passagem de peões (min)
24h-1h	60	10	600	30
1h-2h	900	30	2100	45
2h-3h	900	30	2100	45
3h-4h	900	30	2100	45
4h-5h	900	30	2100	45
5h-6h	900	30	2100	45
6h-7h	900	20	2100	10
7h-8h	5	—	10	—
8h-9h	5	—	10	—
9h-10h	25	—	35	—
10h-11h	25	—	35	—
11h-12h	25	—	35	—
12h-13h	10	—	30	—
13h-14h	10	—	30	—
14h-15h	20	—	45	—
15h-16h	20	—	45	—
16h-17h	20	—	45	—
17h-18h	20	—	45	—
18h-19h	3	—	10	—
19h-20h	3	2	10	5
20h-21h	5	4	30	15
21h-22h	5	4	30	15
22h-23h	5	6	30	20
23h-24h	60	10	600	30

O cenário E apresenta-se como uma variação do cenário D, uma vez que não existem sensores de luminosidade, mas por sua vez a presença de peões/veículos varia ao longo do dia. Para já são apenas relevantes o conjunto de horários entre as 19h e as 7h, dado que nos restantes conjuntos, a passagem de veículos ou peões não interfere na iluminação pública. Também para este caso se recorreu ao desenvolvimento de um *software* (anexo A), cujo output seria novamente o tempo total das lâmpadas ligadas durante a ausência de peões/veículos. Seguindo o principio do cenário D e realizando este cenário tanto com as informações da estrada movimentada, como com as da estrada mais calma, obteve-se respetivamente 5.35 kWh e 5.06 kWh como consumos de energia diários. As poupanças energéticas relativamente ao cenário A, são neste caso, 70.29% (estrada movimentada) e 71.89% (estrada calma). De salientar que a partir do conjunto de horários da estrada mais calma, obteve-se o número total de veículos e peões que passaram na estrada durante a noite, informações essas que permitiram atribuir os intervalos de tempo de passagem dos mesmos, utilizados no cenário D - presentes na tabela 5.3.

5.6 Cenário F - Diferentes horários de presença e de luminosidade

Por fim, o cenário F identifica-se como o mais completo e coincide com uma extensão do cenário E, uma vez que são adicionados também os sensores de luminosidade. Neste caso, para os horários com diferentes percentagens de emissão de luz, tendo em conta a luz exterior, poder-se-ia ter utilizado os mesmos valores da tabela 5.2, presentes no cenário C. Contudo, como agora se tem em consideração também a variação da presença de peões/veículos, estabeleceu-se uma gama de percentagens de emissão de luz, na ausência destes, cujo valor máximo seria de 70% como mostra a tabela 5.5. Quando há deteção por parte do sensor de presença, a lâmpada emite sempre 100% de luz (valor já usado anteriormente e que vai de encontro com a maior sensação de segurança sentida pelos cidadãos nas ruas).

Tabela 5.5: Horários com diferentes percentagens de emissão de luz - Cenário F

	Início (h)	Fim (h)	Percentagem de luz emitida (%)
Horário 1	19	20	30
Horário 2	20	22	60
Horário 3	22	24	70
Horário 4	24	6	50
Horário 5	6	7	30

Através dos dados fornecidos tanto na tabela 5.5, como na tabela 5.3, e recorrendo uma vez mais ao *software* desenvolvido, chegou-se a um valor de consumo energético diário para cada tipo de estrada. No caso da estrada mais movimentada, com um consumo de 3.74 kWh por dia, houve uma poupança de 79.21% relativamente ao cenário A. No que diz respeito à estrada mais calma, o consumo foi de 3.16 kWh, representando uma poupança de energia de 82.45%.

5.7 Contribuição do sistema Pavnext

Através dos dados fornecidos pela tabela 5.4, consegue-se calcular o número de veículos que passam no pavimento de estrada NEXT-Road em cada conjunto de horários. Assim, facilmente se obtém 8016 e 2684 como a quantidade de carros que passam diariamente numa estrada mais movimentada e noutra mais calma, respetivamente. Isto significa que a produção diária de energia gerada pelo sistema *Energy harvesting* da Pavnext, é aproximadamente 13.42 kWh, gerando um lucro de 1.28€ quando passam poucos veículos na estrada. Já quando a circulação é maior, a produção cresce para 40.08 kWh, o que corresponde a um lucro de cerca de 3.81€.

Se for feita uma análise, por exemplo ao cenário A, cujo consumo de energia foi de 18 kWh, consegue-se determinar, tanto a taxa de contribuição energética, como a taxa de contribuição financeira, correspondentes à implementação do pavimento de estrada inovador. Com custos diários de 2.16€, a percentagem de contribuição financeira é de 59.02% (estrada calma) e 176.28% (estrada movimentada), e a percentagem de contribuição energética é de 74.56% (estrada calma) e

222.67% (estrada movimentada). Nas tabelas 5.7 e 5.8, apresentadas no próximo tópico, podem ser analisadas as percentagens de contribuição em cada cenário.

5.8 Visão geral dos resultados

Tendo-se retratado todos os cenários em questão, é importante examinar os resultados obtidos, não sem antes relembrar o seguinte: este estudo foi realizado segundo principios teóricos, dos quais alguns dos valores atribuídos a variáveis apenas procuram representar uma situação especifica, sendo que em situações reais, cada estrada tem condições diferentes, logo são necessárias abordagens diferentes. Há ainda que relembrar que qualquer investimento na implementação do pavimento Pavnext, na substituição de luminárias ou na integração de sensores, não foi tido em conta. O perfil dos cenários e os seus resultados encontram-se, respetivamente, nas tabelas 5.6, e 5.7 e 5.8.

Tabela 5.6: Perfil dos cenários

Cenários	Tipo de lâmpadas	Ligadas toda a noite a 100%	C/sensores de luminosidade	C/sensores de presença	Variação de peões/veículos ao longo do tempo
A	Convencionais	✓			
B	LED	✓			
C	LED		✓		
D	LED			✓	
E	LED			✓	✓
F	LED		✓	✓	✓

Tabela 5.7: Visão geral dos resultados de poupança energética

	Estrada movimentada			Estrada calma		
Cenários	Consumo diário (kWh)	Custo diário (€)	Poupança relativa ao cenário A (%)	Consumo diário (kWh)	Custo diário (€)	Poupança relativa ao cenário A (%)
A	18	2.16	—	18	2.16	—
B	6.42	0.77	64.33	6.42	0.77	64.33
C	5.46	0.66	69.68	5.46	0.66	69.68
D	6.42	0.77	64.34	5.10	0.61	71.65
E	5.35	0.64	70.29	5.06	0.61	71.89
F	3.74	0.45	79.21	3.16	0.38	82.45

Tabela 5.8: Visão geral dos resultados referentes às contribuições dos dispositivos Pavnext

Cenários	Estrada movimentada		Estrada calma	
	Contribuição financeira (%)	Contribuição energética (%)	Contribuição financeira (%)	Contribuição energética (%)
A	176.28	222.67	59.02	74.56
B	494.24	624.30	165.49	209.03
C	581.46	734.47	194.69	245.92
D	494.27	624.35	208.16	262.94
E	593.36	749.50	210.00	265.26
F	847.99	1071.14	336.37	424.89

Observando os resultados, há alguns pontos que "saltam à vista". Em primeiro lugar e como seria de esperar, é na substituição das luminárias convencionais por LEDs, que se encontra a maior taxa de variação de poupança, cujos valores médios se aproximam de 65%. A introdução, tanto de sensores de presença, como de sensores de luminosidade, permitiram neste caso poupar entre 5% a 8% de energia consumida (exceção feita ao cenário D numa estrada movimentada, cujo crescimento variou apenas 0.1% - valor que se explica pelo facto de se ter utilizado um intervalo de tempo de passagem de veículos (12 segundos) inferior ao tempo em que as lâmpadas ficam ligadas quando os mesmos passam (17 segundos)). A conjugação dos dois sensores permitiu uma variação de poupança entre os 14% e os 19% relativamente ao pior cenário.

Os cenários D, E e F são também influenciados pela quantidade de veículos/peões que passam pela estrada. Por um lado, as percentagens de contribuição são melhores numa estrada com maior tráfego de veículos/peões, mas por outro lado, é nas estradas mais tranquilas que se verificam as maiores percentagens de poupança energética referente à aplicação de um sistema de gestão inteligente da iluminação. Esta diferença percebe-se dado que quanto maior o número de veículos, maior a energia gerada pelo pavimento, logo maiores serão os ganhos e menores serão os custos a ter com a quantidade de energia consumida. No entanto, mais veículos/peões, implicam mais tempo de lâmpadas ligadas.

Verifica-se ainda que apenas num caso (Cenário A / Estrada calma) se obtém um valor de contribuição financeira inferior a 100%, o que significa que, em apenas um dos casos (realçando o facto de se tratar do pior cenário), os lucros provenientes da energia gerada pelo sistema NEXT-Road, não cobrem a totalidade dos gastos de consumo das luminárias. Salienta-se ainda que as percentagens de contribuição aumentam ao longo dos cenários (com uma relação média entre a estrada movimentada e a calma de 2.8:1), dado que o lucro obtido e a energia gerada são constantes, e o consumo energético e os gastos associados vão diminuindo em cada abordagem.

A titulo meramente de curiosidade, obteve-se a informação (fornecida gentilmente pela Schréder, fornecedor das luminárias LED escolhidas pela câmara de Esposende) do custo médio de cada luminária colocada na cidade do norte de Portugal. De acordo com a informação recolhida, os preços a que o material foi fornecido a Esposende, variou de acordo com as quantidades apre-

sentadas, desconto de instalador, número de LEDs, existência ou não de telegestão, entre outros, sendo que o que foi divulgado corresponde apenas a estimativas. Ao analisar os preços, verificou-se ainda não existir uma relação diretamente proporcional entre a potência emitida e o custo da luminária (sendo a mais barata de cerca de 200€ + iva, enquanto a mais cara chegava aos 450€ + iva). Especificamente em relação às luminárias LED escolhidas neste estudo a partir do cenário B, as de potência 53.5 W, o seu custo é de aproximadamente 350€ (sem iva), levando a que a substituição total das luminárias implique um investimento de cerca de 3500€. A tabela 5.7 apresenta nos cenários B e F uma percentagem de contribuição financeira numa estrada calma de 165.49% e 336.37%, respetivamente. Se para esta contribuição for também tido em conta os 3500€ de investimento, no ano em que é feita a substituição de luminárias, essas percentagens são substituídas pelos valores 12.31% para o cenário B e 12.79% para o cenário F. Estes resultados garantem um retorno após 19 anos (cenário B) e 10 anos e 8 meses (cenário F). Contudo, uma vez mais estes valores apenas pretendem mostrar o impacto das soluções, pois como não estão a ser considerados outros gastos, nomeadamente o do investimento no pavimento NEXT-Road, os valores de retorno são totalmente irrealistas. A partir deste momento, o presente estudo não contabilizará os gastos referentes à substituição das luminárias.

5.9 Análise de sensibilidade

A elaboração deste estudo envolveu a definição de diferentes variáveis, as quais podem ser divididas em dois grupos: independentes e de controlo.

Deu-se o nome de independentes às variáveis que, apesar de num contexto real não serem constantes, foram definidas neste estudo como sendo valores médios e que não dependem de um controlo de gestão pensado. São o caso da energia gerada aquando da passagem de um veículo, do conjunto de horários com diferentes exposições de luz exterior e dos conjuntos de horários de presença de veículos e de peões.

As variáveis cujos valores forem decididos antecipadamente por quem está encarregue de gerir o sistema, foram denominadas como sendo as de controlo. Destas fazem parte as potências das lâmpadas escolhidas para as luminárias, os tempos que as lâmpadas ficam ligadas quando passa um veículo e quando passa um peão, e ainda, as percentagens de luz emitida consoante a quantidade de luz exterior (i.e nos momentos de não deteção por parte do sensor de presença).

Neste tópico pretende-se avaliar a influência que cada variável de controlo tem nos resultados finais. De forma a simplificar, apenas serão tidos em conta, o pior e o melhor cenário (A e F, respetivamente).

A tabela 5.9 mostra a comparação de todos os conjuntos de lâmpadas a utilizar nos cenários A e F, presentes na tabela 5.1 e cuja poupança energética se encontra dentro do intervalo [66.69% ±5%], com a correspondente contribuição financeira. Como se vê claramente, quanto maior a potência da lâmpada, menor a contribuição do sistema Pavnext, sendo que é de salientar que o menor valor de potência LED utilizado no cenário F numa estrada movimentada, apresenta uma

Tabela 5.9: Influência da potência das lâmpadas na contribuição financeira

Estrada movimentada				Estrada calma			
Cenário A		Cenário F		Cenário A		Cenário F	
Potência (W)	Contribuição (%)	Potência (W)	Contribuição (%)	Potência (W)	Contribuição (%)	Potência (W)	Contribuição (%)
70	377.74	26.1	1738.21	70	126.48	26.1	689.50
100	264.42	35.7	1270.79	100	88.53	35.7	504.09
100	264.42	36.2	1253.24	100	88.53	36.2	497.12
150	176.28	53.5	847.99	150	59.02	53.5	336.37

contribuição de 1738.21%, o que equivale a uma diferença monetária relativamente aos custos anuais do cenário A, de cerca de 1309.82€.

Recuando até ao tópico 5.4, recorde-se que foi definido o tempo que as lâmpadas estariam ligadas consoante o valor de velocidade média de um peão (1.3 m/s) e de um veículo (50 km/h) dentro de uma cidade. Para perceber a influência que os tempos escolhidos têm nos resultados finais, o mesmo estudo será feito para uma gama de velocidades de peões no intervalo [1.2-1.4] m/s, enquanto a de veículos será de [40,60] km/h. Para cada um dos casos, os tempos encontram-se representados na tabela 5.10, enquanto as diferentes percentagens de poupança tendo em conta os tempos de presença no cenário F, podem ser vistas na tabela 5.11.

Tabela 5.10: Gama de tempos das lâmpadas ligadas aquando da presença de veículos/peões

Velocidade peão (m/s)	TLig.ped (seg)	Velocidade veículo (km/h)	TLig.vei (seg)
1.2	200	40	22
1.3	185	50	17
1.4	171	60	14

Tabela 5.11: Influência dos tempos de presença de veículos/peões na poupança

	Estrada movimentada			Estrada calma		
	TLig.vei			TLig.vei		
TLig.ped	14 seg	17 seg	22 seg	14 seg	17 seg	22 seg
171 seg	79.51%	79.31%	78.99%	83.12%	82.57%	81.66%
185 seg	79.41%	79.21%	78.89%	83.00%	82.45%	81.54%
200 seg	79.30%	79.11%	78.78%	82.87%	82.33%	81.42%

Os valores de poupança pouco variam com a variação dos tempos de presença, continuando a apresentar resultados altos em qualquer uma das soluções. A alternativa com a percentagem menor numa estrada calma continua a ser melhor do que a de maior percentagem numa estrada movimentada. Da tabela 5.11 destaca-se ainda o facto da variação entre a melhor e a pior solução numa estrada com muitos veículos (0.73%) ser também menor do que a mesma variação numa estrada com pouco movimento (1.7%). Se a mesma análise for levada a cabo relativamente às

taxas de contribuição, esta variação é uma vez mais menor na estrada movimentada (29.3%) do que na estrada calma (32.0%).

Por fim, a última das variáveis de controlo prende-se com a percentagem de luz a emitir tendo em conta a quantidade de luz exterior. Voltando aos dados definidos na tabela 5.5, é necessário realçar que se assumiu que apenas nos horários 1 e 5 haveria alguma luz solar. Nos horários 2, 3 e 4 seria noite, sendo que nos horários 2 e 3 há maior probabilidade de passagem de veículos ou peões, por isso as percentagens de luz emitidas são maiores devido à maior necessidade de segurança. Relativamente ao horário 4 (período mais longo), apesar de ser noite e de ser elevada a necessidade de sensação de segurança, o valor escolhido é inferior dado que a probabilidade de haver alguém a passar na estrada seria baixa. Como se sabe, a deteção de algum movimento por parte do sensor implicaria uma mudança repentina para uma taxa de 100% de luz. Mantendo a taxa de emissão em todos os outros horários e apenas alterando a percentagem de emissão no horário 3 para até 20%, consegue-se, tal como se vê na tabela 5.12, uma subida interessante na percentagem de poupança energética, podendo atingir o valor próximo de 86%.

Tabela 5.12: Influência das taxas de emissão de luz na ausência de veículos/peões

	Estrada movimentada		Estrada calma	
Taxa de luz a emitir (%)	Contribuição (%)	Poupança (%)	Contribuição (%)	Poupança (%)
50	847.99	79.21	336.37	82.45
40	908.19	80.59	367.67	83.95
30	961.27	81.66	396.35	85.11
20	1003.14	82.43	419.73	85.94

Capítulo 6

Análise do Sistema

Os capítulos antecedentes serviram como base de pesquisa e definição de informação imprescindível à perceção e compreensão do sistema que irá ser proposto neste capítulo. Este sistema identifica-se como uma alternativa singular no panorama da IP inteligente por explorar as mais valias oferecidas pelo dispositivo NEXT-Road e inclui-las na sua estratégia. A procura de uma solução consistente, cuja utilização seja viável em cenários com caraterísticas diferentes (6.3), padece de uma necessidade prévia de estipulação de certos requisitos (6.1) e de uma eficiente estruturação do sistema (6.2).

6.1 Estabelecimento de requisitos

Tal como em qualquer projeto, a construção de uma solução de sistema tem de ser sucedida de um levantamento e determinação de um conjunto de requisitos que definam as funcionalidades e caraterísticas da mesma, de acordo com as necessidades do utilizador. A declaração dos requisitos foi organizada consoante a área envolvente (Servidor de aplicação, Servidor de rede, *Power box* e Luminária) e o tipo funcional ou não funcional (constituído por requisitos de design, desempenho e segurança), sendo atribuído um valor de prioridade a cada um (P1, P2 ou P3, de modo crescente em termos de grau de prioridade). Os requisitos funcionais descrevem o que o sistema faz através das suas capacidades, enquanto que os restantes requisitos procuram detalhar a interação entre as essas mesmas capacidades e os utilizadores (que neste caso serão sempre os gestores responsáveis pelo controlo da IP).

6.1.1 Requisitos servidor de aplicação

SAF1	A interface deve poder ser acedida através de um site ou de uma *app*	P3
SAF2	Através da interface, o utilizador deve ser capaz de alterar o modo de controlo das luminárias de automático para manual, o qual permite a alteração da luminosidade de uma ou de um conjunto de luminárias	P3

SAF3	Através da interface, o utilizador deve ser capaz de alterar manualmente a necessidade de receção de aviso em caso de abertura de uma *power box* ou da caixa que contém o sistema eletrónico embebido incluído na luminária (numa situação em que haja uma manutenção programada)	P1
SAF4	Através da interface, o utilizador deve ser capaz de acrescentar, configurar ou apagar dispositivos	P3
SAF5	A interface deve ser capaz de notificar qualquer tipo de falha nos dispositivos	P2

Tabela 6.1: Requisitos funcionais servidor de aplicação

SAD1	Design	Deve suportar uma interface visivelmente intuitiva e fácil de ser utilizada	P2
SAD2	Design	A interface deve garantir a exibição de um mapeamento condizente com a localização de cada dispositivo (luminária e *power box*)	P2
SAP1	Desempenho	Através da interface, o utilizador deve ser capaz de aceder a um histórico com toda a informação recolhida pelos diferentes sensores e todos os dados de emissão das luminárias	P1
SAP2	Desempenho	A interface deve conseguir gerar gráficos tendência, relativos à informação recolhida	P2
SAS1	Segurança	Para aceder à interface deve ser solicitada uma chave de segurança	P2

Tabela 6.2: Requisitos não funcionais servidor de aplicação

6.1.2 Requisitos servidor de rede

SRF1	Deve ser capaz de receber toda a informação enviada por certos dispositivos e guardá-la numa base de dados	P3
SRF2	Deve ser capaz de fornecer ao servidor de aplicação, qualquer tipo de informação que esteja armazenada	P3

Tabela 6.3: Requisitos funcionais servidor de rede

SRS1	Segurança	Deve garantir um sistema seguro e privado, de forma a que a informação recolhida não possa ser acedida por pessoal não autorizado	P3

Tabela 6.4: Requisitos não funcionais servidor de rede

6.1.3 Requisitos *power box*

SPF1	Deve conter um único ID identificativo	P3
SPF2	Deve ser robusta o suficiente para suportar a capacidade de recolha de dados provenientes de diferentes sensores	P1
SPF3	Deve ser capaz de detetar que alguém procedeu à sua abertura e enviar esse sinal para o servidor de rede	P3

Tabela 6.5: Requisitos funcionais *power box*

SPP1	Desempenho	Deve ser flexível o suficiente de modo a que se consiga adicionar e remover sensores com facilidade	P2
SPP2	Desempenho	Deve ser flexível o suficiente para ser capaz de lidar com a implementação de qualquer tipo de inovação na rede, que se traduza em possíveis alterações no sistema	P2

Tabela 6.6: Requisitos não funcionais *power box*

6.1.4 Requisitos luminária

SLF1	Deve conter um único ID identificativo	P3
SLF2	O sistema de controlo de iluminação deve poder ser conectado à rede elétrica	P3
SLF3	O controlo da iluminação deve ser feito de modo a garantir que a iluminação se encontre dentro das normas impostas CIE	P3
SLF4	Deve ser capaz de detetar que alguém procedeu à abertura da caixa que contém o sistema eletrónico embebido incluído na luminária e enviar esse sinal para o servidor de rede	P3

SLF5	O sistema deve ser capaz de identificar que não está a receber nenhuma comunicação, entrando assim em modo de segurança	P3

Tabela 6.7: Requisitos funcionais luminária

SLD1	Desempenho	Deve ser flexível o suficiente para ser capaz de lidar com a implementação de qualquer tipo de inovação na rede, que se traduza em possíveis alterações no sistema	P3

Tabela 6.8: Requisitos não funcionais luminária

6.2 Conceito de sistema

A solução presenteada através deste sistema pode ser repartida em cinco secções essenciais: Luminária, NEXT-Road, *Power Box*, Servidor de aplicação e Servidor de rede. Estes encontram-se devidamente retratados no SBS (System Breakdown Structure) em 6.1.

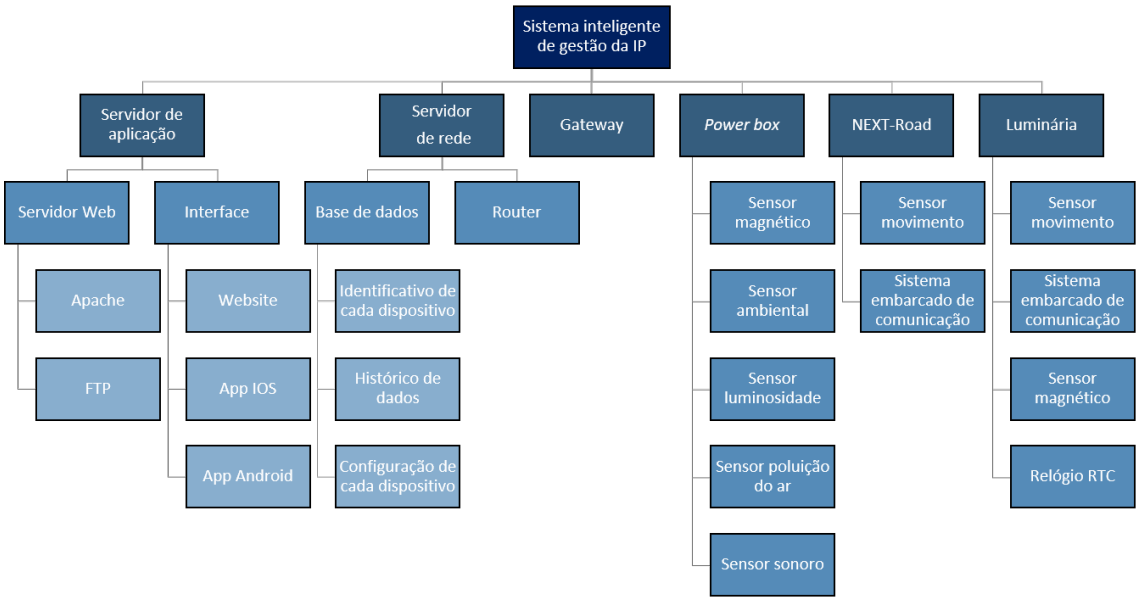


Figura 6.1: System Breakdown Structure

Como foi referido logo na introdução desta dissertação, a Pavnext através do seu dispositivo inovador (NEXT-Road) compromete-se a identificar a passagem de um veículo num certo local da estrada. Essa informação é então transferida para a *power box* que se encontra junto ao pavimento, e de seguida, enviada para um servidor que permite a monitorização do tráfego rodoviário. Esta capacidade de perceção do instante de passagem de veículos na estrada, abre espaço à inclusão desta característica num sistema de gestão inteligente da IP, enquadrando-se como uma distinção em relação a outros sistemas semelhantes. Salienta-se, desde já, que este sistema se encontra mais direccionado a um controlo da iluminação através da perceção de veículos relativamente a peões, contudo essa componente pode ser acrescentada, como aliás será observado mais à frente neste capítulo.

A deteção de um veículo por meio do NEXT-Road, evita a necessidade de instalação de sensores de presença em todos os postes de iluminação, garantido assim uma redução de custos em comparação com outras estratégias. Adicionalmente, esta característica ao assegurar a distinção entre passagem de veículos e peões, proporciona um controlo da iluminação por parte das luminárias condizente com as necessidades da estrada. Sempre que uma *power box* recebe a notificação de passagem no pavimento de estrada, esta para além de enviar essa informação para uma *gateway* ligada à internet, envia-a também para um conjunto de luminárias presentes numa certa área (habitualmente próxima da *power box* e que corresponda a um dos trajetos possíveis que o veículo pode tomar), servindo como *trigger* de ativação para que as lâmpadas passem a emitir o máximo de iluminação (atuando sempre como uma transmissão que funciona através de *triggers* por eventos). Para isto ser possível, é necessário que cada dispositivo (*power box* e luminária) contenha um ID único, de modo a que a *power box* seja configurada para comunicar exatamente com as respetivas luminárias (do lado das luminárias, estas devem ser configuradas para se certificarem que os dados que estão a receber provêm da *power box* correta). De forma a que implementação deste sistema seja robusta, esta deve ser ágil o suficiente para ser aplicada em estradas que não contenham os dispositivos fornecidos pela Pavnext. Nesses casos, a deteção do movimento deve ser feita através de um sensor de presença (cuja distinção entre veículo e peão não é tão precisa, mas pode ser executada através de um processo de distância ao sensor) numa luminária específica que depois de identificar a passagem de um veículo, aplica os mesmos procedimentos de comunicação que uma *power box* desenvolveria naquele lugar. Dado que o controlo da iluminação não é executado a partir do servidor, é correto afirmar que se está perante um sistema descentralizado, ou seja, distribuído.

Para além da dependência da deteção de movimento, este sistema utiliza ainda os recursos oferecidos por sensores de luminosidade. Dado que os níveis de luz não variam ao longo de uma área à qual pertence um conjunto de postes de iluminação, faz sentido que os sensores sejam colocados nas *power box*, em detrimento da sua colocação em luminárias (evitando uma vez mais gastos desnecessários). Sempre que o sensor deteta uma variação de luminosidade (dentro dos intervalos previamente estabelecidos pelo técnico de gestão), é feita uma transmissão para os diferentes postes de iluminação, de forma semelhante ao que acontece na deteção de movimento, todavia com um *trigger* diferente, que influenciará a quantidade de luz que a lâmpada irá transmitir

(estes conceitos são abordados na secção 6.2.3).

De forma a aumentar as funcionalidades do sistema, podem ser adicionados mais sensores aos que já foram mencionados. Sensores sonoros (que permitam identificar um barulho fora do comum, como por exemplo um acidente de um carro), sensores de poluição do ar ou sensores ambientais/atmosféricos são incorporados neste sistema garantindo que a monitorização oferecida pelo servidor, não seja apenas relativa ao tráfego rodoviário, mas também referente aos parâmetros alusivos aos sensores. Seguindo a mesma lógica de raciocínio apresentada aquando da menção aos sensores de luminosidade, qualquer um dos três sensores referidos é colocado na *power box*. Ademais, a inclusão de um outro sensor, um sensor magnético, deve ser tida em conta, com o objetivo de aumentar os níveis de segurança do sistema através da deteção de abertura de porta da *power box* ou da caixa da luminária, locais onde se encontram os circuitos embarcados de controlo e comunicação. Caso essa abertura seja detetada, uma notificação é enviada para o servidor como sendo um alerta.

Qualquer umas das comunicações é feita por *wireless* (escolha preferencial ao uso de comunicações físicas como PLC, devido às suas vantagens, entre outras, a propensão de aplicações em sistemas IoT) o que implica em casos raros que estas possam estar sujeitas a falhas. Na eventualidade de isso acontecer durante algum tempo, o sistema entra em modo de segurança, onde as lâmpadas acendem com intensidade máxima. Este modo é garantido pela inclusão de relógios RTC, em detrimento de relógios astronómicos que apresentam um custo mais elevado, custo esse que acaba por não compensar as vantagens associadas, dado que estes dispositivos apenas são utilizados em casos de segurança. Os RTC são adicionados em cada luminária para que estas saibam que se a partir de uma certa hora da noite, ainda não tiverem recebido qualquer *trigger* de mudança de luminosidade, devem entrar em modo de segurança. Estes relógios garantem ainda que as lâmpadas não se desliguem durante a noite caso alguém tente iluminar artificialmente o sensor de luz presente na *power box*.

Apesar do sistema se encontrar bem definido, ”abre espaço” à utilização de comunicações *wireless* que consigam fazer transferências de longas distâncias ou comunicações de curto alcance mas que contenham capacidade *multi-hop*. No primeiro caso, as *power box* transmitem e as luminárias funcionam tendencialmente apenas como recetores de informação. Já na segunda hipótese, dado que as comunicações são de baixo alcance, as luminárias devem estar conectadas umas às outras de modo a que algumas delas estejam configuradas para funcionar como repetidores. Ao se encontrar num edifício fechado e seguro, a *gateway* obriga a que, caso a comunicação seja realizada em curtas distâncias, existam luminárias perto o suficiente da mesma para que a informação circule (condição que não é necessária em comunicações de grande alcance).

A *gateway* comunica por Ethernet com um servidor de rede que permite que todos a informação recebida seja guardada numa base de dados PostgreSQL. Para além dos dados recolhidos pelos sensores, também a informação relativa à configuração e identificação dos sensores é guardada. Este servidor encontra-se também associado a uma plataforma Web gerida por um servidor Web (Apache) que utiliza protocolos FTP para transferência de dados. A informação é disponibilizada ao utilizador através de uma interface baseada em HTML, CSS, PHP e JavaScript. Também é pro-

posta a criação de uma *app* tanto para Android, como para IOS que permita que qualquer técnico responsável pela gestão da iluminação a realize através do seu telemóvel.

Através da interface, o utilizador pode controlar e monitorizar toda a informação, gerar gráficos tendência relativos à informação recolhida, receber sinais de alerta e falhas de lâmpadas (indicando que precisam de manutenção), enviar mensagens de desativação dos sensores magnéticos quando está programada a manutenção de um dispositivo, e alterar o modo de funcionamento para manual, através do envio de uma mensagem para uma *power box* a informar que deve ”ignorar” tudo o que recebe de outros dispositivos e agir consoante os comandos do servidor (ou no caso do controlo manual ser apenas de uma luminária, a *power box* deve ”ignorar” apenas os comandos provenientes de outros dispositivos que se destinem a essa luminária).

6.2.1 Mecanismo para desligar/reduzir a intensidade da lâmpada

Apesar de já ter sido explicitada a forma como é dado o *trigger* para ligar/aumentar a intensidade da luz, o mecanismo contrário não foi abordado (exceção feita ao momento em que deixa de ser noite) e compreende algumas dificuldades. As contrariedades deste parâmetro constam de igual modo noutros sistemas diferentes pelo simples facto de que o trajeto de um veículo e o tempo que este demora a percorrer uma estrada nem sempre é linear (um veículo pode entrar numa estrada e estacionar na berma, inverter o sentido de marcha ou simplesmente ficar parado por tempo indeterminado por causa do trânsito). Esta variabilidade de decisão complica a elaboração de uma solução (sendo que possivelmente a melhor abordagem consiste em aplicar um sistema de deteção de movimento por GPS, mas como foi visto em 4.1.1 essa alternativa acarreta outro tipo de problemas). As duas soluções mais fáceis de identificar prendem-se com a utilização de:

- **Múltiplos sensores**. Um cenário em que cada luminária é composta por um sensor de presença. Apesar de não ser uma solução totalmente fiável (um veículo pode por exemplo encontrar-se parado entre dois postes de iluminação, não sendo detetável pelos sensores), é uma solução sólida, contudo, vai contra os principios de implementação deste sistema que se regem pelo aproveitamento das mais-valias oferecidas pelo dispositivo da Pavnext e pela minimização de custos.
- **Intervalo temporal**. A utilização de um tempo predefinido até se dar a diminuição da luminosidade após a passagem de um veículo, é uma vez mais vista como uma solução pouco robusta, pois se o veículo estacionar ou apanhar trânsito na estrada correspondente, o funcionamento do sistema será incorreto.

A solução encontrada para este problema e que mais se relaciona com os objetivos deste sistema, abrange as duas alternativas sugeridas. A ideia passa por introduzir um sensor de presença num conjunto de luminárias, intercaladas umas das outras, por um número limitado e pré-definido de outras luminárias. De preferência, tanto a primeira luminária da rua, como a última devem conter sensores de presença, sendo que após a passagem do veículo pelo último sensor de presença da estrada, é iniciado um intervalo de tempo curto cujo fim coincide com a diminuição da luminosidade. Adicionalmente, é introduzido um tempo de *timeoff* relativamente significativo, para a

diminuição da intensidade luminosa, aplicado nos casos em que o último sensor da rua não deteta passagem de veículo, sendo que sempre que um sensor instalado na rua (com exceção do último) detetar a passagem de um veículo, o tempo de *timeoff* reinicializa. Salienta-se que, se porventura os dispositivos Pavnext forem implementados na rua, pelo menos uma das luminárias da área não necessita de ter um sensor de movimento acoplado (habitualmente o sensor correspondente à primeira ou última luminária da estrada).

6.2.2 Expansão do sistema para inclusão de controlo por deteção de peões

Se o movimento de um veículo não é considerado constante, o movimento relativo ao trajeto de um peão é praticamente imprevisível. Um peão pode deslocar-se numa estrada e simplesmente parar para ver uma montra, entrar num caminho paralelo destinado apenas a peões, mudar de passeio, mudar de sentido e ainda há que ter em conta que diferentes peões podem percorrer o mesmo percurso em tempos distintos. Todos estes fatores aumentam ainda mais a complexidade do problema, contudo, a solução exposta apresenta muitas semelhanças com a que foi referida na subsecção anterior (6.2.1).

A introdução de sensores de presença é também neste caso fundamental, não obstante, há que ter em conta alguns fatores. Um deles prende-se com a posição do poste de iluminação no passeio pois este pode estar na parte interior (mais longe da estrada) ou na parte exterior (mais perto da estrada). Caso a posição seja exterior ao passeio, mesmo em casos onde a luminária já contém um sensor para detetar a presença de veículos, tem de ser adicionado um outro sensor direcionado para o passeio com vista à deteção de peões. Se o poste de iluminação se encontrar na parte interior ao passeio, o mesmo sensor pode ser utilizado para detetar tanto peões, como veículos (relembrando que neste caso, a distinção é realizada através da distância ao sensor).

Dada a maior complexidade deste problema relativamente ao da subsecção anterior, a solução passa por reduzir o número de luminárias de intervalo entre as que apresentam sensores de deteção de movimento de peões. O princípio de presença de sensores na primeira e última luminária da rua mantém-se, assim como a existência de um tempo de *timeoff*. Neste contexto, sempre que um peão passar junto à última luminária, esta deve comunicar com todas as luminárias da rua seguinte, de forma a que aumentem a intensidade, e deve ainda iniciar o curto intervalo de tempo cujo final coincide com a diminuição da intensidade das luminárias da rua anterior.

6.2.3 Controlo da iluminação

Conforme descrito, a intensidade de luz emitida pelas luminárias rege-se por *triggers* dados ou por sensores de movimento ou por sensores de luminosidade. Relativamente aos primeiros, estipulou-se que estes nem sempre servem como *trigger* (durante o dia, não importa que passem veículos/peões, visto que as lâmpadas não acendem), mas quando o fazem, garantem que seja emitida a intensidade máxima de luminosidade, por segurança. Quanto aos segundos, dividiu-se a escala de valores de luminosidade, recolhidos por um sensor (desde o mínimo até ao máximo) em cinco intervalos, relacionando-os com percentagens de 0%, 20%, 40% e 60%, correspondentes

à intensidade de luz a emitir por cada luminária. Destaca-se o facto da máxima percentagem declarada ser 60%, o que significa que as luminárias apenas vão a 100% quando há passagem de peões ou veículos. Apesar de ter sido definida esta abordagem como base, um gestor de IP que adote o sistema sustentado nesta dissertação, poderá alterá-la de modo a garantir outros valores de poupança energética.

Para uma melhor compreensão e simplificação desta síntese, atribui-se um número/estado a cada intervalo de valores recolhidos pelo sensor de luminosidade (0-0%, 1-20%, 2-40%, 3-60%, 4-100%). Neste enquadramento, os princípios de controlo da iluminação são os seguintes:

- Enquanto ainda for de dia (estado 0) as luminárias encontrar-se-ão desligadas;
- Quando o sol se começa a pôr (estado 1 ou 2) as luminárias vão acendendo (consoante o valor de luz detetado). Os sensores de movimento não são ainda considerados, uma vez que ainda existe luz exterior suficiente, não sendo necessária uma intensidade de luminosidade de 100% (evita-se também que ocorram mudanças bruscas de intensidade desnecessárias);
- A partir do momento em que escurece (estado 3), os sensores de movimento já são tidos em conta;
- No último sensor de presença da estrada, caso seja detetada a passagem de um peão, o tempo t representado no diagrama da figura 6.2 é igual TLig.ped e caso a passagem seja de um veículo, esse mesmo tempo t corresponde a TLig.vei (tal que TLig.ped > TLig.vei). No mesmo gráfico, X $\in$ [0,3];
- Na eventualidade de haver um veículo e um peão na estrada em simultâneo, dá-se prioridade aos tempos relativos aos peões, aumentando assim o grau de segurança;
- O sistema entra em modo de segurança quando as luminárias não se encontrarem no estado 3 ou 4 a partir de uma certa hora da noite, implicando a mudança de todas luminárias para o estado 4 por segurança;

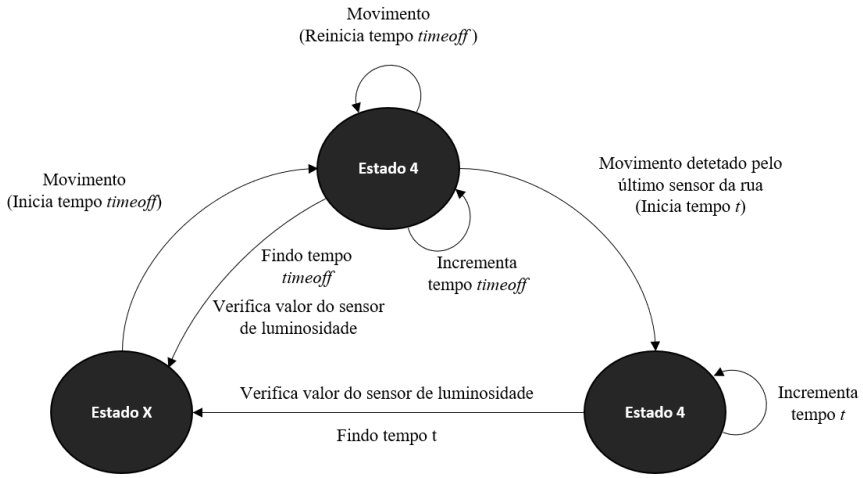


Figura 6.2: Diagrama de estados de controlo da iluminação

6.2.4 Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema evidencia a interação entre os diferentes componentes pertencentes ao sistema e pode ser observada através da figura 6.3, cuja legenda dos sensores se encontra representada na figura 6.4.

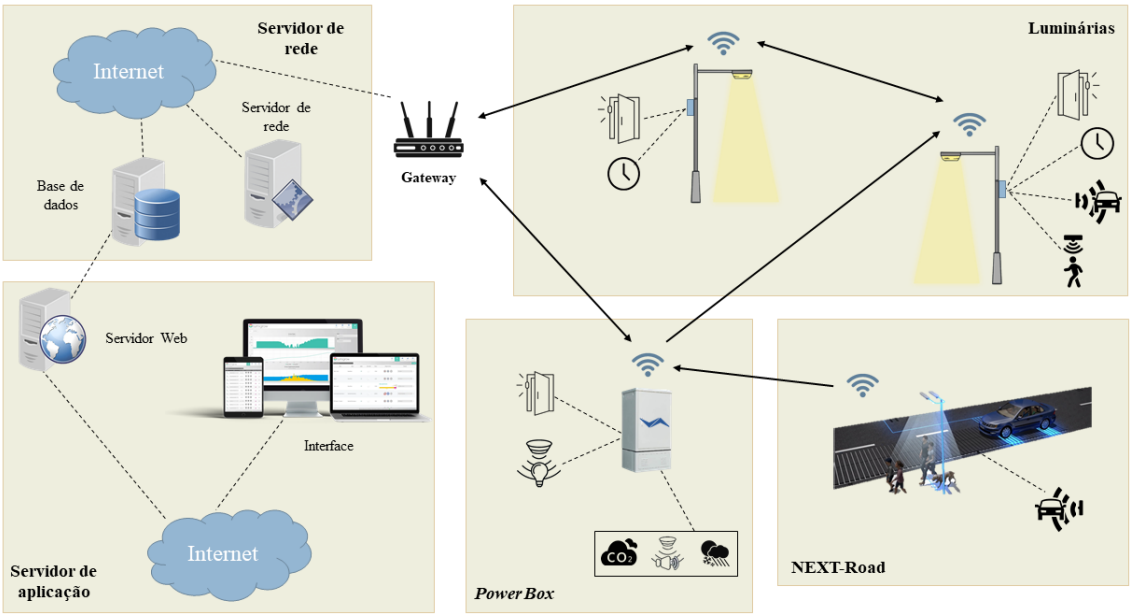


Figura 6.3: Arquitetura do sistema

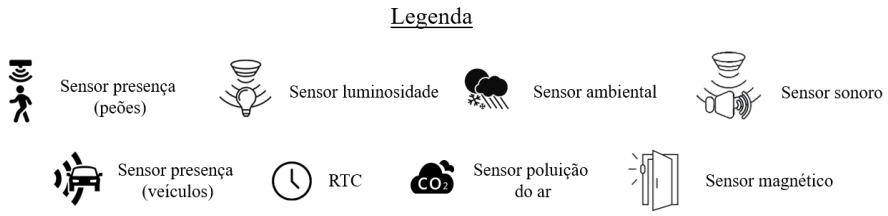


Figura 6.4: Legenda sensores

Relembrando as questões que devem ser colocadas aquando da implementação de uma solução de gestão de IP de forma inteligente e que foram propostas no final do capítulo 4, a estrutura deste sistema ganha a seguinte forma:

Instalação de novas luminárias ou aproveitamento das já existentes?	**Aproveitamento das já existentes, desde que utilizem a tecnologia LED**
Redes com comunicações *wireless* ou através de fios cablados?	**Redes *wireless***

Sendo *wireless*, deve ser escolhido um protocolo que permita comunicações de longo alcance ou um que apenas comunique a curtas distâncias?	**Ambos**
Sistema de controlo centralizado ou distribuído?	**Distribuído**
Que tipo de sensores faz mais sentido utilizar?	**Obrigatoriamente sensores de presença e luminosidade. Aconselha-se o uso de sensores magnéticos. Aceita-se ainda a adição de sensores sonoros, ambientais e de poluição do ar**
Os sensores devem ser instalados nas luminárias ou em segmentos individuais?	**Ambos**
Qual o mecanismo para saber o instante de desligar/reduzir a intensidade da lâmpada?	**Abordado em 6.2.1**
Como é feito o controlo da iluminação?	**Abordado em 6.2.3**

Tabela 6.9: Síntese das principais caraterísticas do sistema

6.3 Aplicação do sistema em diferentes cenários

Após a análise de todas as vertentes do sistema e respetivas interações, é fundamental visualizar a aplicabilidade do mesmo em possíveis locais práticos. Para esta secção escolheram-se dois cenários com complexidades diferentes, ambos estudados em contextos distintos, de modo a perceber a robustez do sistema, funcionando em controlo automático. Alguns aspetos partilhados pelo primeiro cenário (mais simples, 6.3.2) e pelo segundo cenário (mais complexo, 6.3.3) encontram-se mencionados em 6.3.1.

6.3.1 Caraterísticas comuns a ambos os cenários

- As luminárias são todas iguais (independentemente da cor);
- Admite-se uma distância entre luminárias de cerca de 30 metros;
- Assume-se que os estudos realizados através dos cenários, ocorrem apenas de noite;
- O protocolo de comunicação utilizado (de capacidade de curtas ou longas distâncias) não é tido em conta, de modo a que apenas se realça que existe uma comunicação entre uma *power box* (ou luminária) e um conjunto de luminárias;

- A partir do momento em que a estrada muda de direção (independentemente de ser ou não a mesma estrada), considera-se como sendo nova;
- As luminárias encontram-se na posição interior do passeio, significando que o mesmo sensor pode ser utilizado para detetar peões e veículos;
- As luminárias que contêm um sensor de presença instalado, usam como alcance máximo o traço descontínuo de cada rua (ou seja, apenas conseguem detetar movimento no passeio ou na via da estrada mais próxima);
- As luminárias coloridas a cinzento não dispõem de sensores de presença;
- Ao possuírem sensores de movimento, as luminárias a verde, são utilizadas para detetar veículos e peões;
- Ao possuírem sensores de movimento, as luminárias a amarelo, funcionam da mesma maneira que as verdes, apenas com a diferença de serem também responsáveis pela comunicação com todas as luminárias da(s) rua(s) seguinte(s), caso haja a deteção de passagem;
- Ao possuírem sensores de movimento, as luminárias a vermelho, são utilizadas para detetar apenas peões, contudo funcionam também (tal como as amarelas) como emissor no envio das mensagens de *trigger* para as luminárias da(s) rua(s) seguinte(s);
- As estradas estão identificadas com uma letra, enquanto as *power boxes* se encontram assinaladas com um número;
- No panorama da comunicação, todas as luminárias coloridas a cinzento correspondem apenas a recetores de informação, ao passo que todas as outras (verdes, vermelhas e amarelas) funcionam não só como recetores, mas também como transmissores (podendo também ser repetidores);

6.3.2 1º Cenário

Este cenário (figura 6.5) carateriza-se pela presença de três estradas, A, B e C, compostas respetivamente por 8, 18 e 18 luminárias. Existe somente um conjunto de dispositivos Pavnext instalado. Se o cenário for considerado exatamente conforme é apresentado (ou seja sem a presença, nem de veículos, nem de peões), todas as luminárias encontram-se a emitir luz a 60%.

Imagine-se um contexto em que um veículo se desloca pela rua B (proveniente da A). Este passará no dispositivo NEXT-Road, o qual comunicará com a *power box* (1), que por sua vez indicará a todas as luminárias da estrada C para aumentarem a luminosidade para a intensidade máxima. Assim que o veículo muda de direção para entrar na estrada C, o condutor verá todas as luminárias a 100%, não havendo o perigo de se sentir ofuscado pela mudança de luz. O veículo segue caminho até que entretanto chega ao seu destino (não localizado na estrada C). Quando regressa, o condutor decide fazer o percurso inverso. Neste caso, não existe nenhum pavimento de redução de velocidade, pelo que o *trigger* é dado pela última luminária da rua C (representada

pela cor amarela). Ao detetar movimento de um veículo, esta luminária envia essa informação para todas as luminárias da estrada B e inicializa o tempo TLig.vei (ao fim do qual, permite que as luminárias da rua C voltem a um estado de luminosidade reduzida). Ao circular por B, o condutor do veículo vê a casa de um amigo e decide estacionar para o cumprimentar. O tempo de *timeoff* (que tinha sido inicializado aquando da passagem do veículo pelo primeiro sensor da rua) é atingido, permitindo que as luminárias reduzam a intensidade de luz (salienta-se que existe a possibilidade de existir um inconveniente no caso do condutor estacionar o veículo junto a uma luminária com sensor de presença, o que obriga a um mecanismo de reinício do tempo de *timeoff* mais consistente). Quando decide já serem horas de regressar, o condutor do veículo retorna à estrada e ao passar novamente num sensor de movimento, as luzes da rua voltam a acender a 100%, reiniciando-se o tempo de *timeoff*.

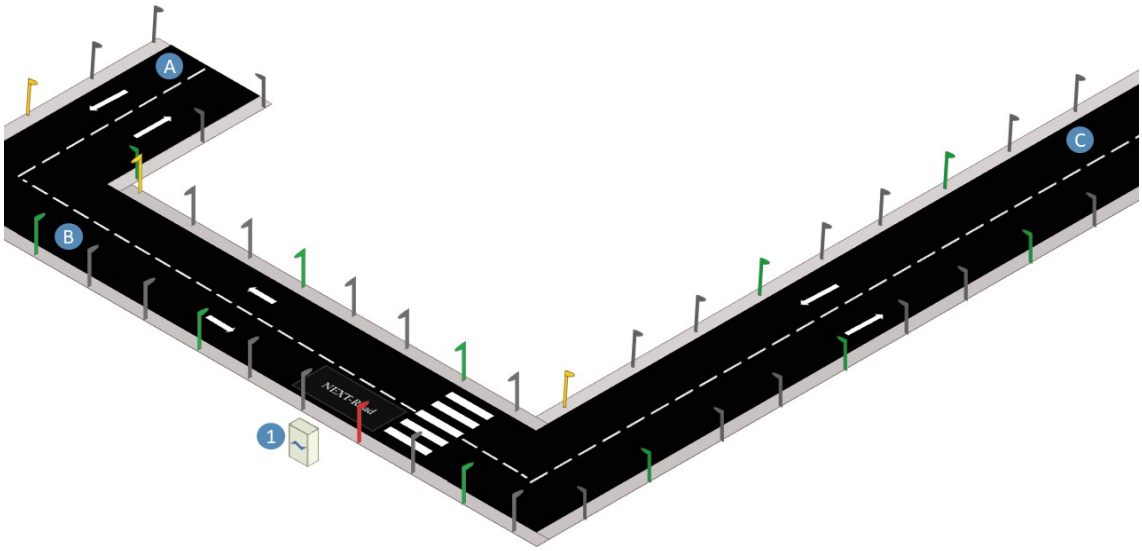


Figura 6.5: 1º Cenário

Imagine-se agora um contexto semelhante, contudo o veículo é substituído por um peão. Este faz exatamente o mesmo percurso que o veículo realizou, no entanto, fá-lo a pé e sempre pelo passeio. O que muda? As alterações são poucas e dizem apenas respeito à primeira passagem do peão pela rua B. Como as mais valias apresentadas pelo pavimento NEXT-Road não são consideradas neste caso, a deteção do movimento do peão é obtida pela luminária a vermelho que por sua vez irá promover a comunicação com as luminárias da estrada C, podendo utilizar a *Power box* como meio intermediário. Ao passar o último sensor da rua B (em qualquer um dos lados da estrada), inicializa-se o tempo TLig.ped que é incrementado até que as luminárias da estrada B saiam do estado de intensidade máxima de luz. Os princípios de controlo da iluminação empregues no resto do percurso são idênticos aos citados no contexto anterior.

6.3.3 2º Cenário

Este cenário (figura 6.6) carateriza-se pela presença de quatro estradas, A, B, C e D, compostas respetivamente por 8, 16, 7 e 17 luminárias. Existem agora dois conjuntos de dispositivos Pavnext instalados. Uma vez mais, num contexto inicial, sem peões, nem veículos as luminárias emitem luz a 60%.

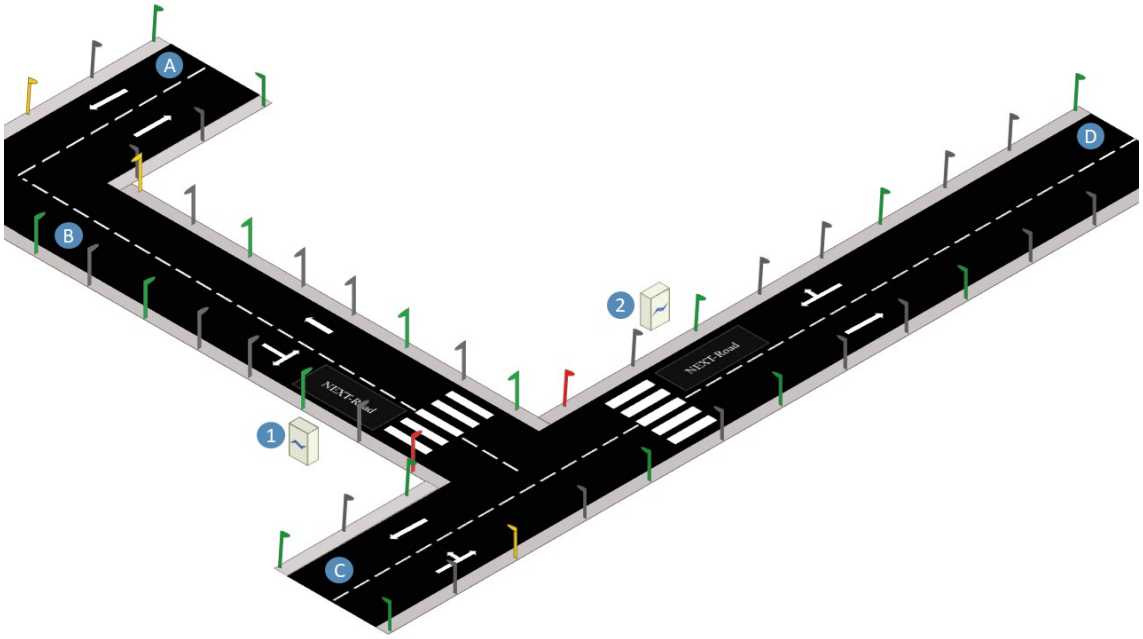


Figura 6.6: 2º Cenário

Este cenário é mais complexo do que o anterior, contudo os principios são exatamente os mesmos. Iniciando novamente um contexto de circulação de um veículo pela rua B (proveniente de A), ao passar pelo NEXT-Road, a informação é novamente enviada para a *Power box*. Neste caso no fim da rua, o veículo pode tomar duas direções distintas (estradas C e D) o que torna o percurso imprevisível. Como não é sabido (antes de mudar de direção) qual o rumo que o condutor pretende tomar, a *Power box* (1) fica encarregue de comunicar com todas as luminárias da rua C e D. O veículo decide virar para a estrada D e o sensor instalado na primeira luminária da rua C ao aperceber-se (ao fim de um intervalo de tempo muito curto) que não houve deteção de movimento, garante a diminuição da luz emitida pelas luminárias presentes nessa mesma rua (este conceito torna-se desmedidamente complexo se for aplicado em peões). Ao ir pela estrada D, o condutor apercebe-se que se enganou e decide inverter o sentido, passando pelo NEXT-Road ligado à *Power box* (2). Esta é responsável por comunicar com todas as luminárias das estradas B e C. Sendo aplicados todos os princípios mencionados até ao momento, o veículo decide retornar pela estrada B, contudo logo a seguir à passadeira é obrigado a parar devido ao trânsito. O veículo fica parado durante todo o suposto tempo de *timeoff*, porém as lâmpadas neste caso não baixam a intensidade da luz, em virtude do trânsito, que garante que existam obrigatoriamente veículos

no radar de algumas luminárias com sensores (representadas a verde) implicando que este tempo esteja constantemente a ser reinicializado.

Para um contexto de peão, são aplicados os conceitos abordados no primeiro cenário. Nesta secção, assinalou-se a dificuldade de implementar em peões, um dos princípios impostos na circulação de veículos. Este pormenor deve-se ao facto de um peão poder livremente circular no passeio de qualquer um dos lados da estrada (ao contrário do veículo que apenas apresenta uma via para se deslocar). Assim, num contexto em que um peão circula pelo passeio da rua B e de seguida atravessa para a rua D, as luminárias da rua C (que foram a 100% aquando da deteção de passagem na luminária vermelha da rua B) apenas reduzem a intensidade de luz ao fim do tempo de *timeoff*.

Capítulo 7

Desenvolvimento do Sistema

A análise do sistema proposto, efetuada no capítulo anterior, serviu de base à construção de um protótipo de comunicação com consequente controlo de iluminação. Ao longo deste capítulo, encontram-se retratadas as várias fases do projeto, que teve início numa escolha da comunicação *wireless* a implementar (7.1), acompanhada de uma sintetização das ideias a concretizar (7.2). Tendo o projeto idealizado, realizou-se uma pesquisa de identificação dos materiais adequados à implementação do sistema (7.3). Após estes passos, construiu-se e desenvolveu-se o protótipo previsto (7.4), fase essa que após o seu término permitiu a execução de testes em situações reais e laboratoriais (7.5).

7.1 Seleção do tipo de comunicação

O sistema apresentado no capítulo 6 ressalvou a possibilidade de serem utilizadas comunicações *wireless* de grande alcance ou curto alcance, mas com capacidade de *multi-hop*. Posto isto, após toda a informação recolhida sobre transmissões *wireless* e depois do estudo de quais as comunicações com maior propensão de serem utilizadas futuramente em sistemas de gestão inteligente da IP, propôs-se que a melhor alternativa para transmissões a longas distâncias seria a comunicação LoRa, enquanto a melhor solução para distâncias curtas seria a utilização da comunicação ZigBee.

A tabela 7.1 sumariza as principais diferenças entre os dois protocolos.

Tabela 7.1: ZigBee vs LoRa

Parâmetros	LoRa	ZigBee
Tipo de rede	LPWAN	WPAN
Consumo de energia	Mais baixo do que ZigBee	Baixo
Frequência de operação na Europa	433 MHz 868 MHz 2.4 GHz (Mais recente)	868 MHz 2.4 GHz
Topologia de rede	Estrela *Mesh*	Estrela *Mesh* Árvore
Alcance	3-4 Km (Áreas urbanas) +10 Km (Áreas rurais)	10-100m 1-3 Km
Tempo de vida útil baterias	Alto	Baixo
Modulação	CSS (LoRa) FSK	BPSK OQPSK
Taxa de dados (Máxima)	27 kbits/s (Modulação LoRa) [52] 50 kbits/s (Modulação FSK) [52] (Consoante os valores de SF, BW e CR)	250 kbits/s
Latência	Depende dos valores de SF, BW, CR	< 20 ms

7.2 Idealização do protótipo

Procurando aplicar alguns conceitos do sistema proposto de gestão de IP, após uma breve discussão com o CEO da Pavnext, Francisco Duarte, estipulou-se que se iria conceber um protótipo de comunicação entre dois nós, formando uma interação simples Ponto-a-Ponto. Dado que o objetivo consistia em utilizar os protocolos mencionados, definiu-se que existiria um nó emissor com módulos de comunicação LoRa e ZigBee a comunicar com dois nós recetores, dos quais, um conteria um módulo LoRa e o outro um módulo ZigBee, tal como mostra a figura 7.1, que espelha a organização do projeto.

Um dos únicos requisitos impostos pela Pavnext para a implementação deste protótipo, consistiu na utilização de um XMC4500 Relax Kit, placa de desenvolvimento criada pela Infineon Technologies, para garantir o controlo do programa gerado do lado do emissor da comunicação. Os microcontroladores da Infineon são suportados pelo DAVE™, um *software* de desenvolvimento que utiliza o IDE do Eclipse, corre programas em linguagens C/C++ e abrange um conjunto de ferramentas que permitem a geração automática de código (APPs).

Definiu-se que o controlo da iluminação seria todo realizado do lado do emissor, enviando para os módulos recetores apenas comandos de mudança de luminosidade, funcionando assim como uma comunicação com *triggers* causados por eventos externos. Cada um dos módulos recetores encontrar-se-ia conectado a um microcontrolador que garantisse a gestão da iluminação emitida por uma lâmpada LED. Procurou-se aplicar um *trigger* diferente para cada transmissão e, por isso mesmo, recorreu-se a um sensor de presença para recolher informações destinadas à comunicação ZigBee e a um simples botão de pressão destinado à comunicação LoRa (na prática, a execução do sistema, nunca envolveria a utilização de um botão, sendo que, neste caso apenas foi escolhido para diferenciar o *trigger* dado a cada comunicação). A luminosidade do cenário exterior também foi tida em conta, através da presença de um sensor de luz que permitisse a alteração da intensidade luminosa das duas lâmpadas existentes no projeto, sempre que necessário. Para facilitar o desenvolvimento do projeto, decidiu-se utilizar LEDs numa fase inicial, em detrimento das lâmpadas, de forma a garantir primeiramente o controlo da iluminação e só depois permitir que esse controlo fosse aplicado em lâmpadas LED.

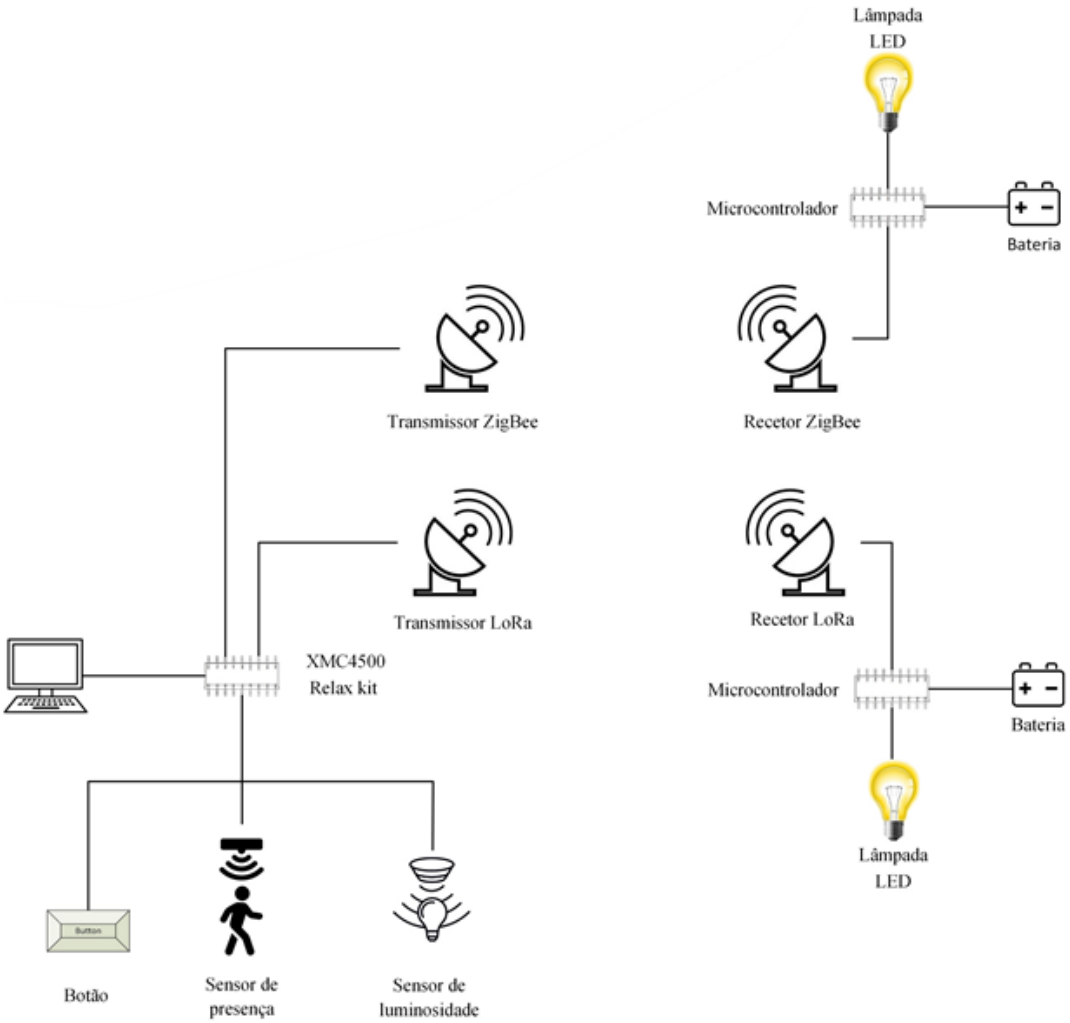


Figura 7.1: Esquema do protótipo

7.3 Estudo de mercado

A idealização do projeto serviu, não só para perceber como iria funcionar o sistema a desenvolver, mas também para listar todas as tecnologias necessárias à implementação do protótipo. Nesse sentido, seriam necessários:

- 2x Microcontroladores;
- 1x XMC4500 Relax Kit;
- 1x Sensor de presença;
- 1x Sensor de luminosidade;
- 1x Botão de pressão;
- 10x LEDs (5 para cada nó recetor);
- 1x Par de módulos de comunicação LoRa;
- 1x Par de módulos de comunicação ZigBee;
- 2x Lâmpadas LED 12 V;

Grande parte dos componentes mencionados não foram alvo de uma grande pesquisa em termos de análise de mercado, por considerar-se que a existência dos mesmos nas instalações da Pavnext (e o facto desses cumprirem os objetivos pretendidos), evitaria gastos superiores aos necessários. Assim sendo, dos componentes mencionados, as tecnologias que já existiam na empresa eram:

- **Microcontroladores**: Arduino Uno e Arduino Nano;
- **XMC4500 Relax Kit**;
- **Sensor de presença**: HC-SR04;
- **Sensor de luminosidade**: Módulo fotoresistência LDR 5528;
- **Botão de pressão**;
- **LEDs**: Kingbright (múltiplas cores);
- **Dois projetores LED 12 V**;

O Arduino é provavelmente a placa composta por um microcontrolador mais escolhida para lidar com uma diversidade de aplicações, usufruindo de um IDE e de uma linguagem muito simples e intuitiva. Estas vantagens, associadas ao facto de não ser necessário um micro com elevada capacidade de processamento, visto apenas ser preciso executar uma *task* individualmente, salientaram o facto dos Arduinos serem placas de desenvolvimento capazes de lidar com o controlo da iluminação (associado aos recetores da comunicação). Foi então escolhido um Arduino Uno para a comunicação ZigBee e um Arduino Nano para a comunicação LoRa.

As caraterísticas do HC-SR04 (sensor ultrassónico) indicam que este apresenta um alcance máximo de 4 metros e um alcance mínimo de 2 centímetros (valores que permitem detetar peões que caminhem pelo passeio e veículos que circulem apenas na faixa rodoviária mais próxima da

luminária). O dispositivo tem dimensões pequenas e apresenta um ângulo de medição reduzido, de 15º, o que restringe a área de deteção para a direção desejada. Estas caraterísticas permitiram considerar o sensor adequado.

O módulo LDR 5528 é baseado numa fotoresistência, ou seja, uma resistência variável, a qual será menor à medida que a luz incidente sobre a mesma é maior e vice-versa. Ao apresentar dimensões pequenas e sendo capaz de garantir a deteção da intensidade da luz exterior consoante valores entre 0 e 1023 lux, admitiu-se como sendo válida a escolha deste sensor para a implementação do sistema.

Desta forma, os componentes que tiveram de passar por um processo de escolha seletiva e uma minuciosa análise de mercado, foram os módulos de comunicação de ambos os protocolos. Para a seleção destes dispositivos, foram considerados cinco parâmetros, sendo eles: **preço**, **prazo de entrega**, **caraterísticas**, **facilidade de incorporação no projeto** e **data de lançamento**. Esta investigação envolveu uma pesquisa pelas principais distribuidoras em Portugal (RS Components, Farnell e Mouser), assim como por algumas lojas locais do país.

7.3.1 Módulos de comunicação LoRa

Para a solução de comunicação baseada em LoRa foram considerados alguns rádios transcetores (funcionam como emissores e recetores) que operam numa gama de frequências de sub-GHz (SX1261, SX162, SX1268, SX1272, SX176, SX1278) e um outro rádio que opera a 2.4 GHz (SX1280). Tanto SX1268, como SX1278 foram imediatamente excluídos, uma vez que este sistema iria ser elaborado na Europa e estes módulos de comunicação foram configurados para serem utilizados na Ásia (mais especificamente, na China). A tabela 7.2 apresenta as melhores soluções de transcetores integrados em IC's, distinguidas consoante os parâmetros pré-definidos.

Tabela 7.2: Comparação entre módulos de comunicação LoRa

Parâmetros	SX1261MB2BAS	LAMBDA62-8D	RF-LORA-868-SO	TEL0117	LAMBDA80-24S
Transcetor	SX1261	SX1262	SX1272	SX1276	SX1280
Frequência	868 MHz	868 MHz	868 MHz	868 MHz	2.4 GHz
Preço	28.08 €	16.58 €	18.10 €	37.32 €	13.81 €
Prazo de entrega	3 semanas	24/48 horas	24/48 horas	7 semanas	7 semanas
Alcance máximo	—	+20 Km	+16 Km	2-3 Km	—
Potência de Tx máximo	+14 dBm	+22 dBm	+20 dBm	+20 dBm	+12.5 dBm
Facilidade incorporação no projeto	Necessidade de soldar	Não requer trabalho extra	Necessidade de soldar	Não requer trabalho extra	Necessidade de soldar

Todos os dispositivos presentes na tabela operam a frequências válidas de serem utilizadas na Europa, contudo a gama de frequências baseada em sub-GHz encontra-se habitualmente mais associada a sistemas IoT, visto que não estão sujeitas a tantas interferências como as comunicações que operam a 2.4 GHz [53], retirando-se assim o LAMBDA80-24S das opções de escolha. Apesar dos diferentes valores observados para a potência máxima de transmissão, de acordo com a LoRa Alliance® [54], a potência máxima de Tx que garante a especificação de LoRaWAN é 14 dBm. A implementação de um projeto que inclua a necessidade de adquirir dispositivos, por si só, deve ter em grande consideração o tempo de espera para a chegada dos mesmos. A acrescentar a esta reflexão, o momento em que se procurou realizar estas encomendas, coincidiu com o pico da pandemia de Covid-19 em várias partes do mundo, o que poderia influenciar o tempo necessário de envio. Consequentemente, o parâmetro de prazo de entrega foi fundamental para a exclusão do TEL0117 como uma alternativa de eleição. Sendo que a duração de envio do SX1261MB2BAS era também considerável e como era das três possibilidades restantes, a mais cara, foi também descartada. Em relação às possibilidades que sobraram, com custos e tempos de entrega semelhantes, o LAMBDA62-8D acabou por ser o escolhido, em detrimento do RF-LORA-868-SO, uma vez que não obrigaria a processos de solda (que poderiam eventualmente danificar o dispositivo) e garantiria distâncias de alcance maiores. É também importante realçar que SX1262 (tal como SX1261) faz parte da última geração de transcetores lançados pela Semtech num passado recente, havendo por isso pouca informação disponibilizada ao público.

Qualquer módulo de comunicação necessita de uma antena e a opção de compra por um LAMBDA62-8D não incluía uma. Todavia, apesar de não estar inicialmente listado como um dispositivo presente nas instalações da Pavnext, a própria empresa adquiriu entretanto um par de antenas com o intuito de serem usadas num outro projeto paralelo. Funcionando à frequência de 868 MHz e podendo ser também utilizadas para a construção do protótipo proposto nesta dissertação, não foi necessário fazer uma compra de antenas, nem uma correspondente análise de mercado. Para agregar as antenas ao protótipo, foi no entanto necessário adquirir adaptadores em formato de fio com interface SMA fêmea (dado que a antena contém um conector em formato macho).

7.3.2 Módulos de comunicação ZigBee

Os módulos de comunicação avaliados que permitem o protocolo ZigBee são produzidos pela Digi e denominam-se por XBee, podendo atualmente fazer parte das séries 1, 2 ou 3. Apesar de existirem alguns dispositivos capazes de funcionar a 868 MHz, para a análise de mercado, apenas foram tidos em consideração módulos que operam a 2.4 GHz, visto ser a frequência padrão para todos os módulos. Antes de uma pesquisa pelas várias distribuidoras mencionadas de forma a comparar módulos de comunicação através de parâmetros como o preço, ou o prazo de entrega, foi importante conhecer as várias caraterísticas entre as diferentes gerações destes dispositivos, de modo a perceber qual a mais adequada ao protótipo idealizado para este trabalho.

Os primeiros dispositivos XBee a serem lançados para o mercado fazem parte da série 1 e são sinónimo de simplicidade, pois não necessitam de ser configurados. O aparecimento da família

de módulos pertencentes à série 2, permitiu a possibilidade de configuração manual dos módulos, assim como a escolha de um modo de comunicação (transparente ou API), abrindo espaço para um maior leque de aplicações. A série 3 destes dispositivo é a mais recente e constitui uma evolução de algumas caraterísticas relativamente às outras séries. À priori, quanto mais atual é o equipamento, maior será o alcance da comunicação. Dentro de cada série, existe um modelo normal e um modelo Pro, sendo os segundos responsáveis por maiores capacidades de alcance, contudo a sua utilização não é válida na Europa, tendo sido por isso descartados. Em cada uma destas séries, existem ainda quatro alternativas relativas à integração de uma antena, podendo esta vir incorporada na PCB/fio ou não ser incluída, existindo nesses casos uma saída U.FL ou RPSMA para a antena. A tabela 7.3 diferencia as melhores opções de compra relativas às três famílias de módulos mencionadas, através dos mesmos cinco parâmetros aplicados para os módulos LoRa.

Tabela 7.3: Comparação entre módulos de comunicação ZigBee

Parâmetros	XB24-ASI-001	XB24CZ7WIT-004	WRL-15128
Série	1	2	3
Frequência	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Preço	19.67 €	17.92 €	21.01 €
Prazo de entrega	24/48 horas	24/48 horas	4 semanas
Alcance máximo	100 m	1200 m	1200 m
Potência de Tx máximo	+0 dBm	+8 dBm	+8 dBm
Antena	Conector RPSMA	Antena por fio	Conector U.FL

Pese embora tenha sido analisado um exemplo de XBee da série 1, o facto destes dispositivos estarem a ser descontinuados, de forma a apostar em módulos das séries 2 e 3, serviu de mote à exclusão de XB24-ASI-001. As diferenças entre as caraterísticas de XB24CZ7WIT-004 e WRL-15128 eram poucas, porém o facto de ser necessário a compra de uma antena externa e o facto do prazo de entrega ser muito superior, decidiu-se não optar pela compra de um WRL-15128.

Ainda que não tenha sido preciso comprar nenhum acessório extra para a antena, dado que esta vinha incorporada em XB24CZ7WIT-004, como este módulo de comunicação necessita de ser configurado antes de ser feita uma comunicação, foi inevitável a aquisição de um adaptador para USB. Para além de permitir uma ligação direta a um computador, onde pode ser realizada a configuração dos parâmetros de comunicação (através de uma plataforma de *software* designada por XCTU), este dispositivo garante também a regulação e conversão da tensão de alimentação de 5 V para 3.3 V e ainda proporciona uma separação entre pinos, compatível com um encaixe numa

breadboard, de forma a facilitar a implementação do protótipo (os módulos XBee apresentam um espaçamento de 2.54 mm entre pinos, que não se coaduna com o espaçamento de 2 mm das *breadboards*).

7.4 Construção do protótipo

7.4.1 *Hardware*

A componente de *hardware* especifica a interligação entre os dispositivos e as correspondentes configurações e pode ser dividida em três setores:

- Nó emissor (LoRa e ZigBee)
- Nó recetor LoRa
- Nó recetor ZigBee

Antes de se iniciar a montagem de dispositivos, procedeu-se à configuração do par de módulos XBee através do XCTU, de modo a assegurar os mesmos parâmetros de comunicação para ambos os aparelhos e a garantir a definição da função atribuída a cada nó (entre ZC, ZR e ZED). Cada um destes equipamentos contém um endereço MAC associado, o qual garante um papel fundamental na implementação do sistema geral mencionado no capítulo anterior, porque permite definir exatamente qual(ais) o(s) nó(s) com que se pretende comunicar e qual(ais) o(s) nó(s) de onde está previsto receber informação. Ao tomar como base o sistema proposto em 6, este protótipo corresponde a uma comunicação entre uma *Power Box* e uma luminária. Nessa perspectiva, a luminária deveria ser configurada como ZR ou ZED, a *power Box* como ZR e a *gateway* (situada num edifício seguro) seria o ZC da rede. Como este protótipo apenas procura montar uma simples interação Ponto-a-Ponto e sabendo que uma rede ZigBee tem que conter sempre um e um só nó coordenador, definiu-se que o nó transmissor seria configurado como ZR (simulando a *power Box*), ao passo que, o nó recetor seria o ZC da rede. Um outro parâmetro indispensável na comunicação ZigBee prende-se com a definição entre o modo AT (transparente) ou API. Configurados em modos de operação AT (mais simples), os módulos de rádio estabelecem uma comunicação através de comandos de bytes que são enviados um a um entre o emissor e o recetor. O modo API distingue-se do anterior, ao transmitir os dados através de pacotes, o que para além de permitir uma maior segurança na definição de protocolos de comunicação, admite ainda que a recolha de informação de múltiplos sensores seja controlada com maior sucesso. As configurações de cada XBee são exibidas nas imagens 7.2 e 7.3.

Como observado, os parâmetros ID e AP têm de ser iguais nos dois módulos. SH e SL em conjunto, formam o endereço MAC do XBee correspondente, enquanto DH e DL dizem respeito ao endereço MAC, com o qual aquele módulo pretende comunicar. Ao ser definido com o endereço 0x0000000000000000 nestes últimos parâmetros mencionados, o emissor fica configurado para apenas comunicar com o nó coordenador da rede. Ao nó recetor fixa-se o endereço 0x000000000000FFFF, indicando que as suas transmissões são sempre enviadas em *broadcast*.

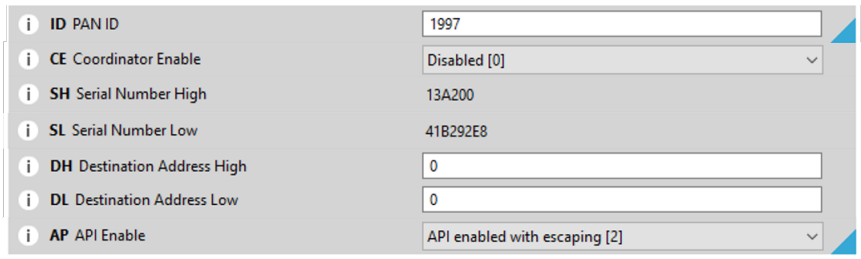


Figura 7.2: Configuração XBee emissor

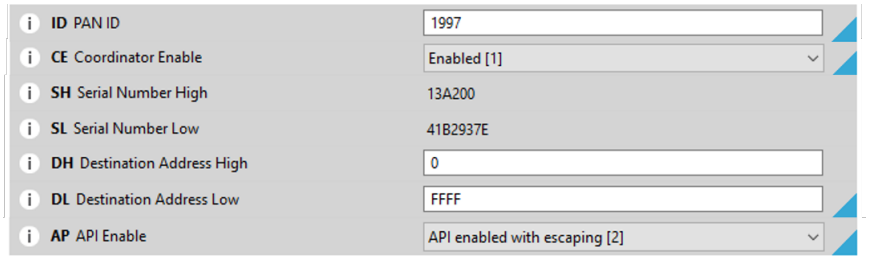


Figura 7.3: Configuração XBee recetor

Relembrando a constituição do nó emissor representada no esquema 7.1, o controlo neste nó é garantido através de um XMC4500 Relax Kit, o qual fornece uma tensão de 3.3 V na saída dos seus pinos (apesar de também conter pinos de fornecimento de 5 V) e possibilita comunicações série por UART, SPI ou I^2C. O módulo de comunicação LoRa é configurado para comunicar em *Full-Duplex* por SPI com o microcontrolador e é alimentado a 3.3 V. Segundo a *datasheet* [55] do transcetor SX1262, a comunicação série deveria ser configurada em modo 0 (CPOL = 0 e CPHA = 0), todavia, na prática verificou-se que esta comunicação apenas funcionava com CPOL = 1, ou seja, em modo 2 ou 3. A comunicação entre o XMC4500 e o dispositivo XBee dá-se por UART, sendo que o micro fornece uma alimentação de 5V ao adaptador do módulo de comunicação. Relativamente aos sensores de presença e luminosidade, ambos são alimentados a 5 V, contudo foi necessário aplicar uma divisão de tensão que convertesse 5 V em 3.3 V em ambos os sensores. Esta particularidade foi tomada em consideração pois o kit XMC4500 corre a 3.3 V e segundo a *datasheet* do microcontrolador [56], não se aceitam tensões de entrada superiores a 4.3 V nos seus pinos. A divisão de tensão foi obtida através do paralelo entre uma resistência de 1 kΩ e uma de 2 kΩ, garantindo o fornecimento de uma corrente ao pino do kit XMC4500 Relax muito inferior aos 10 mA máximos (segundo a datasheet [56]).

As ligações entre os rádios de comunicação recetores e os microcontroladores Arduino são semelhantes às referidas para o nó emissor, excetuando o facto do Arduino ser uma placa de desenvolvimento que corre a 5 V, e por isso mesmo, é necessário a regulação da tensão de saída do microcontrolador para 3.3 V (recorreu-se aos pinos de saída de 3.3 V no Arduino do nó recetor LoRa). Em XBee, essa conversão é garantida através do adaptador para USB). Conforme mencionado no início deste capítulo, o primeiro objetivo deste projeto passou por garantir um controlo de iluminação funcional e eficiente e para isso foram utilizados cinco LEDs de uma só cor em cada nó recetor (azuis no nó ZigBee e amarelos no nó LoRa) (figura 7.4).

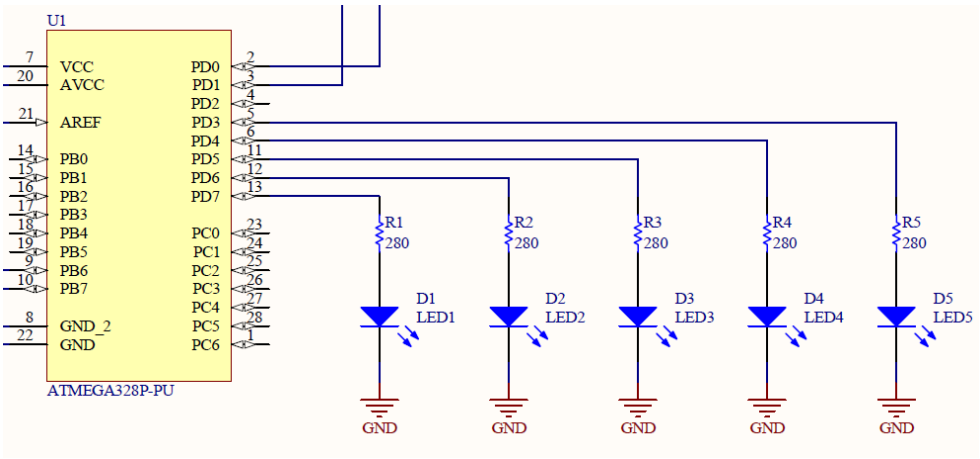


Figura 7.4: Controlo da iluminação através de 5 LEDs

Mais tarde, após verificação de um controlo de iluminação funcional, substituiu-se os LEDs por um projetor de 12 V, acompanhado de um circuito de potência, uma vez que os Arduinos apenas conseguem fornecer tensões de 5 V. Este circuito inclui um optoacoplador (TLP521-4) que garante isolamento elétrico e um mosfet tipo N (FDP025N06-ND) que permite o controlo da iluminação através da passagem de corrente entre os canais de *dreno* e *source*, consoante os comandos que recebe da *gate* (figura 7.5).

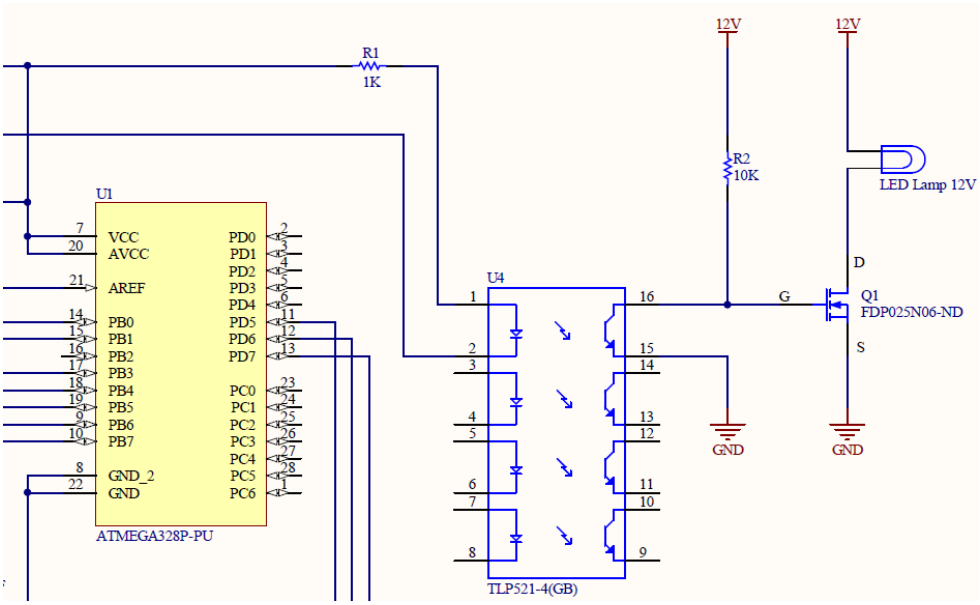


Figura 7.5: Controlo da iluminação através de um projetor LED

As ligações completas entre os dispositivos e os micros, referentes a qualquer um dos nós, podem ser visualizadas no anexo B.

7.4.2 *Software*

Sendo constituído por três nós, o sistema obriga à execução de três programas de controlo, todos escritos em C++. A programação dos arduinos Uno e Nano foi realizada no seu ambiente de desenvolvimento (IDE) padrão, enquanto o desenvolvimento do programa para o XMC4500 foi efetuado na versão 4 (a mais atual) do *software* DAVE, recorrendo a um compilador GCC e a um GDB SEGGER J-Link *debbuger*.

Se por um lado a configuração dos rádios XBee pôde ser feita a partir de uma plataforma de *software*, a configuração dos módulos LAMBDA62-8D teve ser realizada através de código. Na Europa o valor limite de BW a ser utilizado é 250 kHz e nesse caso, o parâmetro de SF tem de ser obrigatoriamente 7. Caso BW seja configurado como sendo 125 kHz, o critério de *Spreading Factor* pode ser um qualquer entre 7 e 12. Posto isto, nos programas de código relativos aos nós emissor e nó recetor LoRa, definiu-se os valores de SF e BW como sendo 7 e 125 kHz, respetivamente, garantindo a transferência de um byte em 46.3 ms, através de uma taxa de dados igual a 5470 bits/s, de acordo com o simulador de tempo no ar disponibilizado pela The Things Network [57]. O CR foi estabelecido como sendo 4/5, valor aconselhado na *datasheet* do transcetor SX1262 [55], enquanto a potência de Tx foi fixada em 14 dBm (máximo na Europa). Apesar do módulo de comunicação poder também recorrer a uma modulação FSK, o programa escrito apenas suporta a modulação CSS (LoRa). A escrita do programa de controlo para o XMC4500, envolveu o aproveitamento de algumas *APPs* disponibilizadas, das quais se destacam:

- *SPI_MASTER*: Utilizado para configurar a comunicação série SPI com o módulo de comunicação LoRa.
- *UART*: Utilizado para configurar a comunicação série UART com o módulo de comunicação ZigBee.
- *ADC_MEASUREMENT*: Utilizado para converter os valores analógicos medidos pelo sensor de luminosidade em valores digitais.
- *DIGITAL_IO*: Usado para configurar os pinos necessários, de forma a funcionarem como portas digitais de entrada e/ou entrada/saída.
- *SYSTIMER*: Interruptor temporal configurado com uma base temporal correspondente a 1 μ, empregue na deteção de certos instantes, necessários à identificação das distâncias captadas pelo sensor de movimento.
- *TIMER*: APP que recorre ao relógio periférico CCU, presente em *hardware*, para disponibilizar um temporizador preciso (definido com intervalos temporais de 1 μ) que permite um funcionamento em segundo plano do resto do código, admitindo que fosse utilizado para criar *delays*.

O programa foi escrito para garantir que os dados fossem enviados pelo ar apenas nos instantes de necessidade de mudança de luminosidade dos LEDs/Projetores. Nesse contexto, a estrutura do código, inclui um controlo da iluminação baseado no diagrama da figura 7.6. Os estados 0, 1, 2, 3 e 4 do diagrama, representam uma certa intensidade de luz a emitir pelo projetor LED, consoante

os valores retornados pelo sensor de luz (de 0 a cerca de 4095). O estado 5, cuja intensidade de luz a emitir é máxima, corresponde unicamente à condição de deteção de movimento.

Como inicialmente se recorreu à presença de cinco LEDs, a percentagem de luminosidade correspondente a cada estado foi simulada através da seguinte premissa:

- Nenhum LED ligado -> Projetor desligado;
- Um LED ligado -> Projetor a emitir a 20%;
- ...
- Cinco LEDs ligados -> Projetor a emitir a 100%;

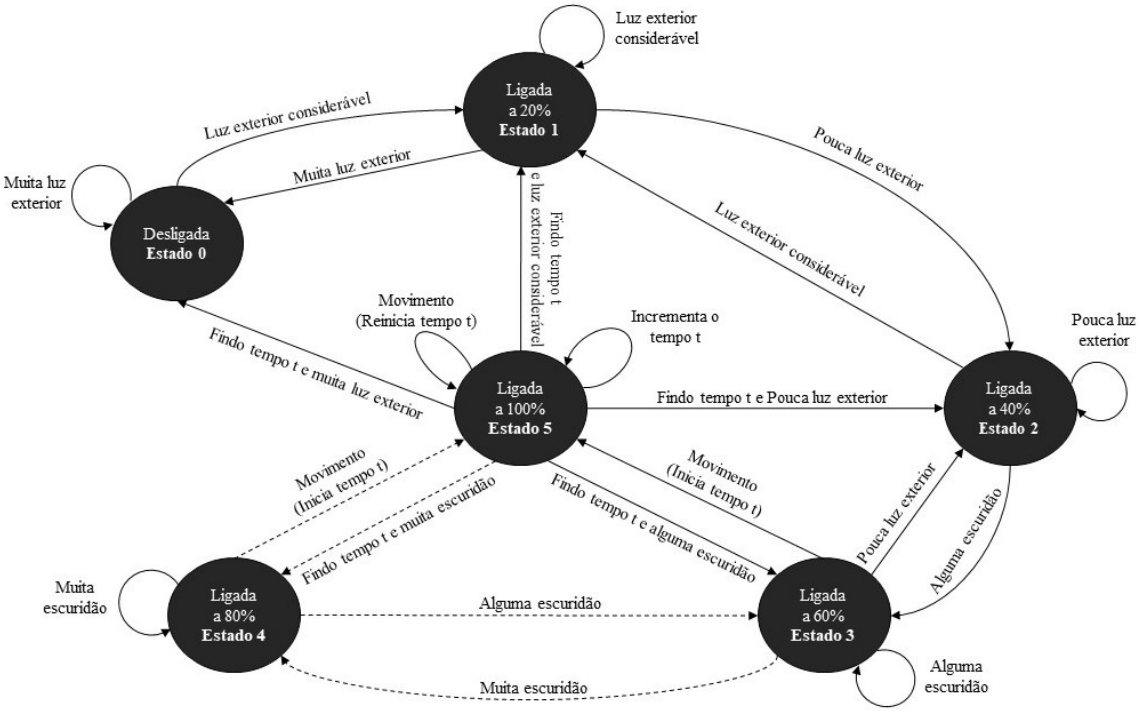


Figura 7.6: Diagrama de estados de controlo da iluminação - Protótipo

Legenda

- **Lum**: Valor de luminosidade
- **Movimento**: Deteção de movimento
- **t**: Tempo definido para a lâmpada estar a 100% quando deteta movimento
- **Muita luz exterior**: Lum > 2700
- **Luz exterior considerável**: 2000 < Lum < 2700
- **Pouca luz exterior**: 1200 < Lum < 2000
- **Alguma escuridão**: 600 < Lum < 1200
- **Muita escuridão**: Lum < 600

Figura 7.7: Legenda diagrama de estados - Protótipo

Constata-se que as setas relacionadas com o estado 4 se encontram representadas a tracejado uma vez que a possibilidade de o projetor iluminar a 80% não foi aplicada (pois seguiu-se o princípio do sistema global onde se garante que a mudança de luminosidade aquando da deteção de movimento, ocorre sempre antes de o utilizador sequer chegar a visualizar as luminárias),

contudo este estado pode ser incluído consoante a gestão da iluminação que se pretenda realizar. Relembrando que o nó emissor é o responsável pela deteção de movimento, é através dos valores recolhidos por esse sensor que o programa de *software* distingue entre a passagem de veículos e peões, condicionando o tempo que as luminárias ficam ligadas à intensidade máxima (assumiu-se como sendo 5 segundos para veículos e 10 segundos para peões). Na eventualidade de estarem constantemente a passar veículos/peões, os tempos correspondentes são reinicializados, sendo que no caso de, ou peões ou veículos, serem detetados durante um período de tempo em que as luminárias já se encontrem a emitir o máximo de luminosidade, é sempre dada prioridade aos tempos associados a peões. É também o programa do emissor que controla o tempo que a lâmpada fica ligada a 100%, enviando uma mensagem que contém a luminosidade atual, informação essa que é lida pelos recetores e interpretada como sendo o *trigger* para sair do estado 5 e mudar para o estado correspondente à luminosidade atual.

Para garantir uma comunicação segura e baseada em pacotes, foi implementado um protocolo de comunicação tanto em LoRa, como em ZigBee. Os módulos de rádio LoRa revelaram-se mais complexos de utilizar, porém evidenciam uma base de transmissão unicamente assente numa faixa de frequências, enfatizando a possibilidade de existirem inconveniências em termos de segurança. Nesse sentido, foi criado um modelo de comunicação baseado num pacote de dados constituído por quatro bytes, enunciados na tabela 7.4.

Tabela 7.4: Protocolo de comunicação padrão

Sequência	Função	Bytes
1º Byte	Definir o início do pacote	0x5A
2º Byte	Definir o módulo de comunicação com que se pretende comunicar	0x21 (LoRa) 0x22 (ZigBee)
3º Byte	Definir a intensidade luminosa a emitir	0x30 (Projetor desligado) 0x31 (Projetor a 20%) 0x32 (Projetor a 40%) 0x33 (Projetor a 60%) 0x34 (Projetor a 80%) 0x35 (Projetor a 100%)
4º Byte	Definir o *checksum* (soma total dos bytes do pacote)	—

No programa do nó recetor LoRa, o pacote de dados é lido e caso algum byte não corresponda ao pretendido, a informação recebida é descartada, não interferindo no controlo da iluminação. O mesmo protocolo padrão foi aplicado em transmissões ZigBee, no entanto este tipo de comunicação que usufrui da presença de endereços de identificação em cada módulo de rádio, foi programada em modo API, ou seja, por natureza já é garantido o envio de dados através de pacotes, assegurando uma maior robustez de segurança nestas transmissões. A figura 7.8 mostra os diferentes constituintes de um pacote de comandos em formato API. O exemplo demonstrado

coincide com uma mensagem de notificação de alteração da intensidade de luz a emitir pelas luminárias, para 40%. O programa que garante a receção dos dados, identifica o endereço emissor, confirma se corresponde ao pretendido e verifica a existência de alguma falha no pacote. Após a adoção do circuito de potência juntamente com o projetor de 12 V, o controlo da iluminação foi realizado com recurso a um mecanismo de comutação da *gate* do mosfet por PWM. As várias vertentes que compõem a estrutura dos diferentes códigos de *software* mencionados, são facilmente compreendidas através dos fluxogramas presentes no anexo C.

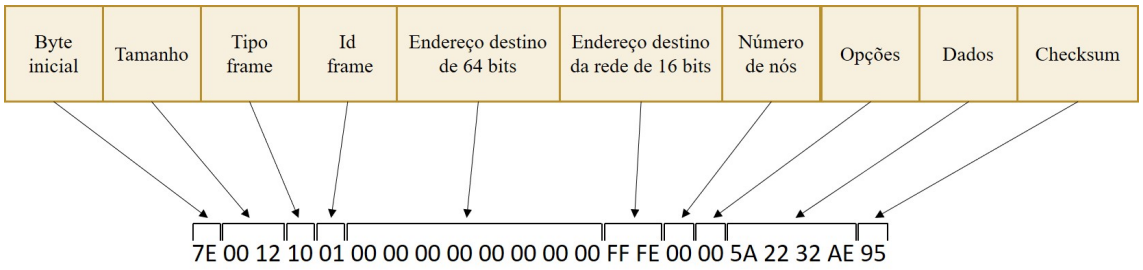


Figura 7.8: Formato de pacote de dados ZigBee em modo API

7.5 Testes realizados e resultados obtidos

À medida que o projeto ia evoluindo, foram sendo efetuados alguns testes, que consistiam apenas em verificações constantes do funcionamento do sistema, acompanhadas de alterações necessárias, tanto a nível de *software*, como a nível de *hardware* (não em relação à mudança de dispositivos, mas sim relativamente a modificações nas ligações entre eles).

Após ter sido considerada como concluída a fase de desenvolvimento do protótipo, a validação do mesmo foi obtida através do estabelecimento e consequente execução de alguns testes finais, que permitiram reconhecer as carateristas, e sobretudo, as capacidades do sistema. Foram realizados testes em dias e cenários diferentes e nem todos os testes incluíram as mesmas propriedades do protótipo, uma vez que existiram algumas condicionantes a ter em conta, como por exemplo a duração das baterias, a possibilidade de utilização dos projetores LED e das antenas de 868 MHz, a dificuldade de transportar o material de um local para outro ou, ainda a necessidade de existir uma alimentação dos microcontroladores recetores (não existindo baterias próprias para esse efeito). Seguindo esta lógica de concretização de diferentes testes com caraterísticas diversas, a descrição desses ensaios será apresentada, numa primeira fase, tendo em conta os testes realizados com os LEDs e, numa segunda fase, tendo em conta as experiências que incluíram o aproveitamento de projetores LED.

7.5.1 Testes com controlo de iluminação através de 5 LEDs

Os ensaios com uso de 5 LEDs em cada nó recetor, revelaram-se mais fáceis de executar, uma vez que os LEDs não necessitavam de uma alimentação externa àquela a que os Arduinos providenciavam (nem sequer de um circuito de potência), tornando mais simples o transporte do

protótipo de um local para outro. Para além dos testes realizados nos escritórios da Pavnext, procurou-se transpor o sistema para um cenário real, tendo sido escolhido um local que permitisse a identificação de passagem de peões e veículos. As experiências (retratadas através das imagens que constam no anexo D.2), foram efetuadas num período noturno, permitindo que se obtivesse os resultados ilustrados na tabela 7.5.

Tabela 7.5: Testes e resultados do protótipo com controlo de iluminação através de 5 LEDs

ID	Teste	Resultado LoRa	Resultado ZigBee
DIST1	Verificar a comunicação a curtas distâncias (2/3 metros)	Cumprido	Cumprido
DIST2	Verificar a comunicação a médias distâncias (30 metros)	Cumprido	Cumprido
DIST3	Verificar a comunicação a longas distâncias (400 metros)	Cumprido com limitações	Cumprido com limitações
LUM1	Observar a mudança instantânea de luminosidade dos LEDs, quando se dá o arranque do programa	Cumprido	Cumprido
LUM2	Observar a mudança de luminosidade dos LEDs, à medida que a luz exterior vai diminuindo	Cumprido	Cumprido
LUM3	Observar a mudança de luminosidade dos LEDs, com variações bruscas e forçadas, da luz exterior	Cumprido	Cumprido
MOV1	Verificar a deteção de passagem de um peão e a correspondente mudança de luminosidade dos LEDs para 100% durante 5 segundos	—	Cumprido
MOV2	Verificar se os 5 segundos correspondentes à passagem de um peão, definidos para os LEDs saírem de 100%, vão sendo reinicializados conforme ocorre a passagem de mais peões	—	Cumprido
MOV3	Verificar a deteção de passagem de um veículo que se desloque a velocidades lentas e a correspondente mudança de luminosidade dos LEDs para 100% durante 10 segundos	—	Cumprido
MOV4	Verificar a deteção de passagem de um veículo que se desloque a velocidades rápidas e a correspondente mudança de luminosidade dos LEDs para 100% durante 10 segundos	—	Cumprido
MOV5	Verificar se os 10 segundos correspondentes à passagem de um veículo, definidos para os LEDs saírem de 100%, vão sendo reinicializados conforme ocorre a passagem de mais veículos	—	Cumprido
MOV6	Confirmar, se é dada prioridade aos peões, em relação aos veículos, quando ocorre a deteção de ambos	—	Cumprido
MOV7	Verificar o instante em que o botão é pressionado e a correspondente mudança de luminosidade dos LEDs para 100% durante 5 segundos	Cumprido	—
CTRL1	Confirmar que ambas as comunicações funcionam em simultâneo	Cumprido	Cumprido
CTRL2	Confirmar que a deteção de movimento/aperto do botão apenas tem influência na luminosidade dos LEDs a partir de uma baixa deteção de luz exterior (que corresponda a uma luminosidade dos LEDs de pelo menos 60%)	Cumprido	Cumprido

Todos os testes de controlo da iluminação foram devidamente validados em ambiente real, exceção feita ao DIST3. A partir de cerca de 400 metros, alguns pacotes enviados não eram recebidos em ambas as comunicações, sendo que também não foi viável realizar testes com distâncias superiores a estas. Foram surgindo alguns inconvenientes ao longo da execução dos testes, principalmente devido às antenas. Uma vez que seria ideal que os módulos de comunicação se encontrassem na mesma linha de visão, tornou-se complicado garantir o posicionamento correto das antenas, à medida que iam sendo feitas deslocações. Para além disso, os adaptadores das antenas de 868 MHz para LoRa, revelaram-se muito frágeis, impedindo uma ligação consistente ao protótipo e contribuindo para as dificuldades encontradas nos testes de comunicação a longas distâncias.

7.5.2 Testes com controlo de iluminação através de projetores LED

Substituindo os LEDs pelos projetores LED de 12 V, e adicionando os exigidos circuitos de potência e controlo de corrente em cada nó recetor, tornou-se mais complicado fazer deslocações, com os vários constituintes do protótipo, para a execução de testes. A prática destes mesmos testes, realizados numa garagem (com pouca luz), envolveu o uso de dois ultracondensadores carregados com 12 V, visto que não foi possível recorrer a baterias capazes de fornecer esta tensão. A tabela 7.6 mostra os testes efetuados e os respetivos resultados obtidos, salientando-se que todo o controlo garantido através do uso dos 5 LEDs, se manteve funcional.

Tabela 7.6: Testes e resultados do protótipo com controlo de iluminação através de projetores LED

ID	Teste	Resultado LoRa	Resultado ZigBee
PROJ1	Verificar os diferentes estados de intensidade de luz emitida pelos projetores (desligados, a 20%, 40%, 60% ou 100%)	Cumprido	Cumprido
PROJ2	Verificar a ocorrência de transições entre estados de intensidade da luz, de forma *smooth* (devido ao emprego de um controlo por PWM)	Cumprido	Cumprido
PROJ3	Averiguar se a intensidade de luz emitida pelos projetores (qualquer que seja o estado) se mantém constante	Cumprido com limitações	Cumprido com limitações

Destacam-se novamente os resultados positivos associados aos testes da tabela 7.6. No entanto, apesar de raros, verificaram-se alguns casos de ocorrência de uma certa instabilidade na luminosidade emitida pelos projetores, indicando que provavelmente, a corrente que circulava por estes dispositivos, apresentava por vezes pequenas variações. Comparativamente com os anteriores, estes testes foram realizados em menor número e durante menos tempo, devido à rápida

descarga a que os ultracondensadores estavam sujeitos, obrigando a várias ações de carregamento dos mesmos.

Num panorama geral, apesar de se não ter garantido, através dos testes, a capacidade de comunicação a distâncias superiores a 400 metros, pode-se afirmar que os resultados obtidos foram muito satisfatórios. Desta forma, este protótipo permitiu validar a possibilidade de implementação de um sistema, semelhante ao que foi descrito no capítulo anterior, tanto na sua componente de controlo da iluminação, como na componente de adoção de uma rede *wireless* de comunicação.

No anexo D, estão apresentadas algumas fotografias tiradas no decurso da realização das experiências mencionadas.

Capítulo 8

Conclusões

A partir da identificação do problema associado aos gastos energéticos e financeiros desnecessários, provenientes de uma iluminação pública que promove um uso de luminárias num estado de intensidade de luz máxima durante todo o período noturno, esta tese permitiu que se salientassem algumas conclusões associadas a um estudo teórico e prático relacionado com possíveis soluções a implementar. Não só foram retiradas algumas conclusões, como também foram destacadas certas noções fundamentais a reter, que poderão ser incluídas em futuros sistemas propostos.

Inicialmente, a visão geral do setor da IP permitiu realçar os principais benefícios da inclusão de fontes luminosa LED, uma vez que estas são sinónimo de rapidez, eficiência, sustentabilidade e segurança. Grande parte das cidades, hoje em dia, já estão mentalizadas para a necessidade de substituição das lâmpadas convencionais por LEDs, principalmente devido às vantagens financeiras, resultantes de uma significativa eficiência energética (pode ser superior a 50%). Contudo, esta dissertação não se focou apenas nas vantagens mais evidentes do emprego de LEDs, enfatizando também a capacidade de regulação eficiente da intensidade da luz a emitir e a possibilidade de utilização destas lâmpadas em sistemas inteligentes de gestão da iluminação.

Destacou-se o crescimento das aplicações associadas a conceitos de *Internet of Things* e *Smart Cities*, concluindo-se que o setor da IP, ao admitir que sejam instalados dispositivos inteligentes em cada um dos postes de iluminação espalhados por uma cidade, que garantem que estes se encontrem conectados entre si, é visto atualmente, como a área com maior propensão de aplicação de sistemas associados aos conceitos mencionados. Esta ideia foi reforçada, através de uma pesquisa sobre as tecnologias de comunicação atuais, que salientou os progressos das transmissões *wireless*. A evolução nesta área tem proporcionado um aumento no número de funcionalidades a que estas estão sujeitas, sendo que dos vários tipos de comunicações *wireless* atuais, as que se inserem em redes LPWAN (nomeadamente LoRa e NB-IoT) são consideradas como o futuro da IP inteligente, integrada em rede. Contudo, comunicações de curto alcance, como ZigBee, também podem ser adotadas em soluções alternativas.

A criação de vários cenários caraterizados funcionalmente de forma diferente, cujo cenário mais simples envolvia o uso de lâmpadas convencionais ligadas toda a noite e o cenário mais complexo era constituído por uma estratégia de regulação da iluminação, baseada em *triggers* dados

por eventos externos, permitiu perceber que um sistema inteligente de controlo da iluminação pode contribuir, em alguns casos, para uma poupança energética de cerca de mais de 20%, relativamente à mudança para lâmpadas LED.

Por fim, propôs-se uma solução relativa a um sistema assente nas mais valias oferecidas pelos dispositivos Pavnext, o qual, juntamente com a análise de alguns artigos e soluções de mercado, possibilitou que fossem evidenciadas as principais vantagens (monitorização de diversos dados recolhidos, eficiência energética de acordo com as necessidades dos veículos e peões que circulam nas ruas, capacidade de identificar o instante de avaria de uma luminária, etc.) e as principais dificuldades (simplificação do sistema de modo a que a sua implementação não esteja associada a custos inexequíveis, escolha do mecanismo de redução da intensidade da luz a emitir por cada luminária, definição do funcionamento do sistema de modo a assegurar os princípios base de segurança e conforto impostos nos objetivos da IP, etc.). Foi possível concluir através da construção do protótipo descrito no capítulo 7, a viabilização de implementação do mesmo no sistema sugerido no capítulo 6.

8.1 Trabalho Futuro

O protótipo desenvolvido corresponde apenas à base da estrutura do sistema proposto. Neste sentido, o trabalho futuro deve envolver, não só alguns aperfeiçoamentos desse mesmo protótipo, como também a sua inclusão num sistema em rede.

Relativamente ao protótipo, dispositivos como o sensor de luminosidade e o sensor de presença, podem ser alvo de uma análise de mercado que permita a escolha sensores com caraterísticas mais adaptáveis ao mundo real. Deve também ser aplicado um relógio RTC, cujo funcionamento deve ser verificado através de um teste que confirme a ativação dos LEDs/Projetores a partir de uma certa hora, sempre que as comunicações *wireless* não funcionem. Ainda no que diz respeito ao *hardware*, deve ser encontrado um método mais eficaz na adaptação da antena de 868 MHz (LoRa), garantindo uma maior robustez ao produto. Após o término desta etapa, aconselha-se a realização de mais testes de longas distâncias, especialmente no que toca à comunicação LoRa (estes podem ser acompanhados de mudanças nos valores de SF e BW, correspondentes às configurações dos módulos).

Propõem-se que o passo seguinte consista na integração de mais nós recetores e mais nós emissores, de modo a que seja configurada uma rede em que cada nó emissor apenas seja capaz de comunicar com alguns nós recetores pré-especificados.

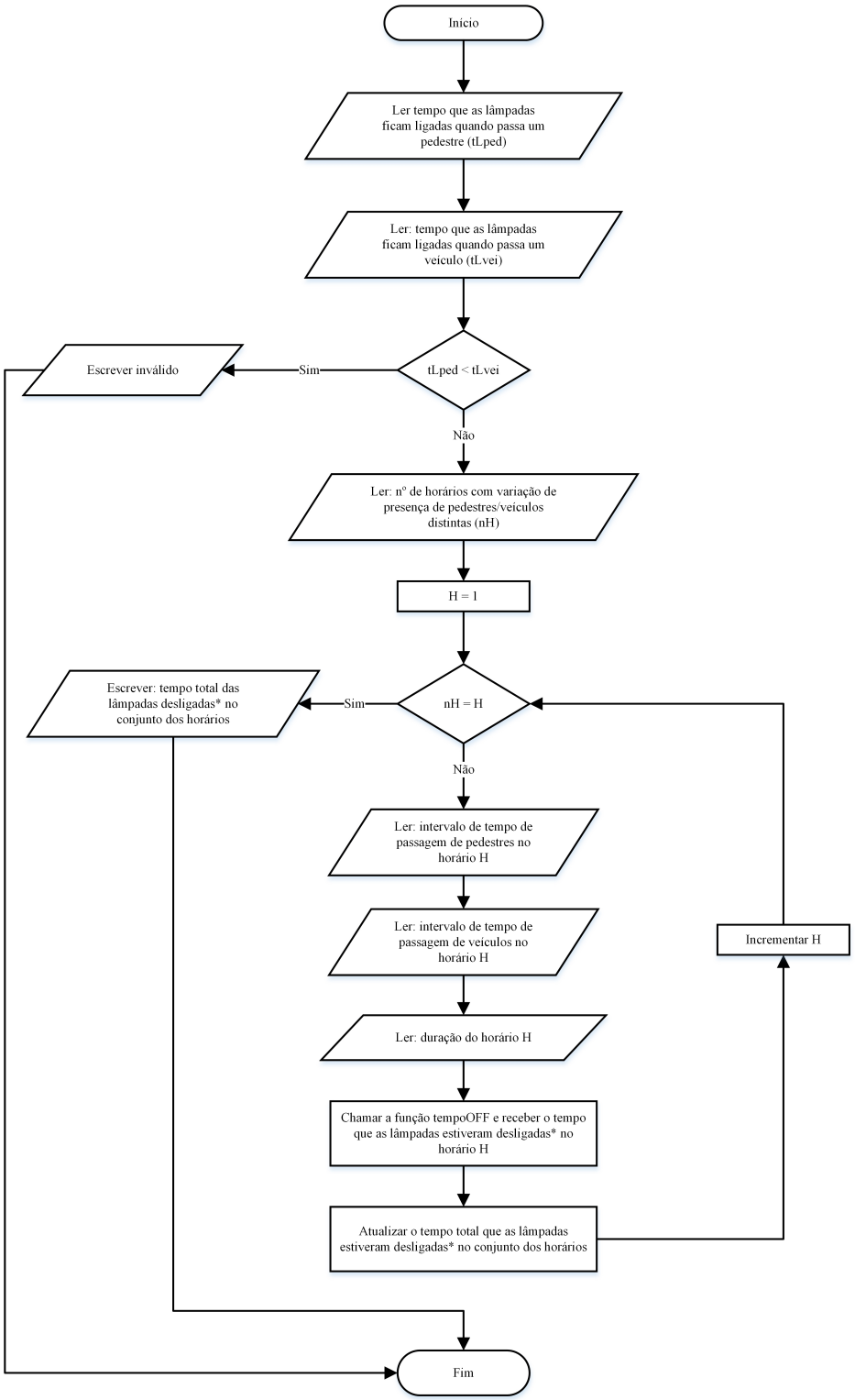
Todo o processo posterior traduz-se na aplicação do sistema sugerido nesta dissertação, ou seja, na capacidade de comunicação dos nós emissores com uma *gateway*, que ao estar ligada a um servidor de rede, garanta a disponibilização de toda a informação recolhida num servidor de aplicação.

Anexo A

Estrutura dos programas de computador desenvolvidos referentes ao estudo dos cenários

Fluxogramas dos *softwares* desenvolvidos no seguimento do estudo apresentado no capítulo 5, referentes a alguns dos cenários mencionados.

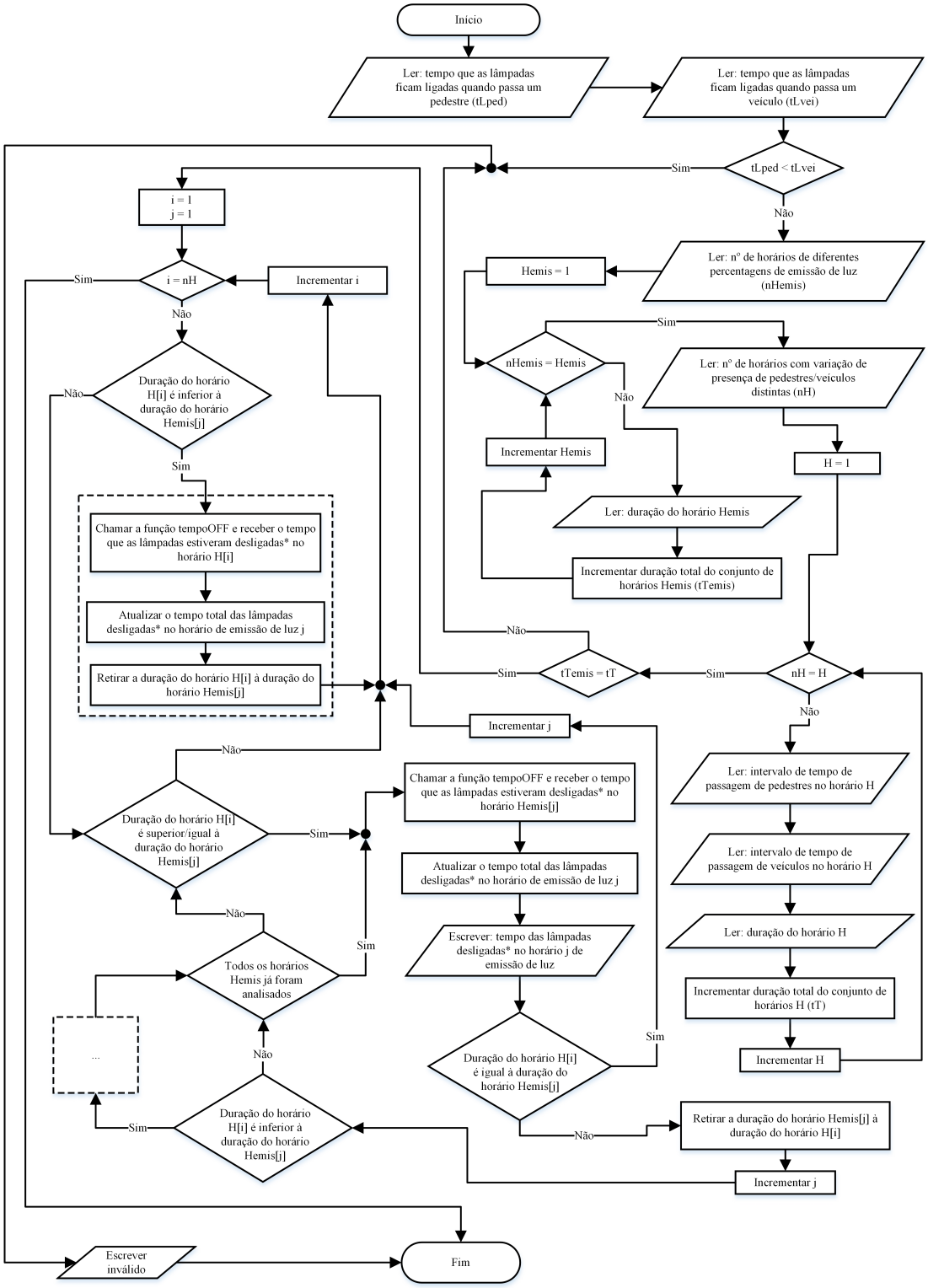
A.1 Cenários D e E



* Por motivos de simplificação, referiu-se ao tempo das lâmpadas ligadas durante ausência de pedestres/veículos como o tempo das lâmpadas desligadas

Figura A.1: Fluxogramas dos códigos correspondentes aos cenários D e E

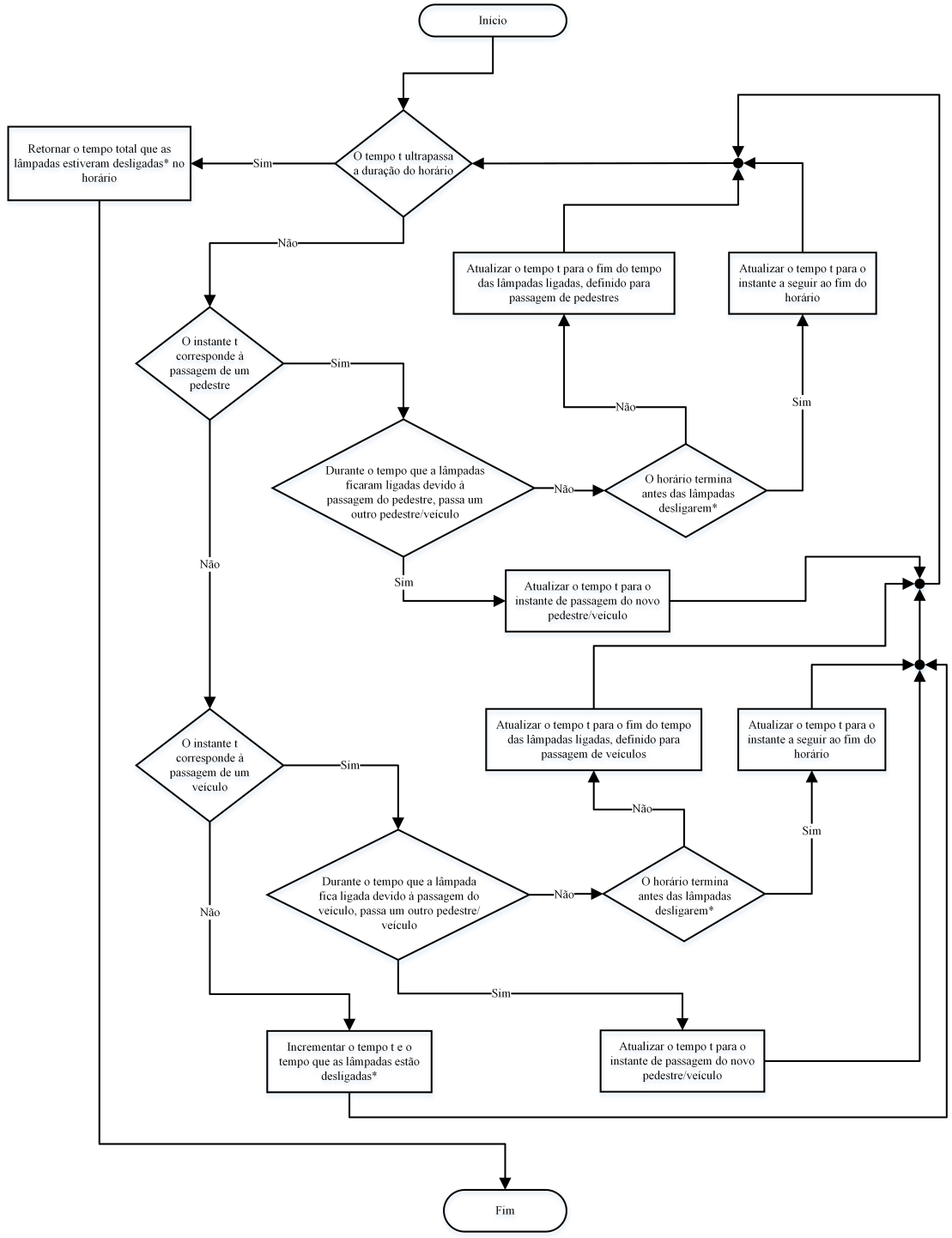
A.2 Cenário F



* Por motivos de simplificação, referiu-se ao tempo das lâmpadas ligadas durante ausência de pedestres/veículos como o tempo das lâmpadas desligadas

Figura A.2: Fluxograma do código correspondentes ao cenário F

A.3 Função tempoOFF



* Por motivos de simplificação, referiu-se ao tempo das lâmpadas ligadas durante ausência de pedestres/veículos como o tempo das lâmpadas desligadas

Figura A.3: Função utilizada nos cenários D, E e F

Anexo B

Hardware relativo ao protótipo implementado

Representações esquemáticas das ligações dos diferentes constituintes do protótipo elaborado (especificado no capítulo 7) e as suas imagens reais equivalentes.

B.1 Esquemático nó recetor LoRa

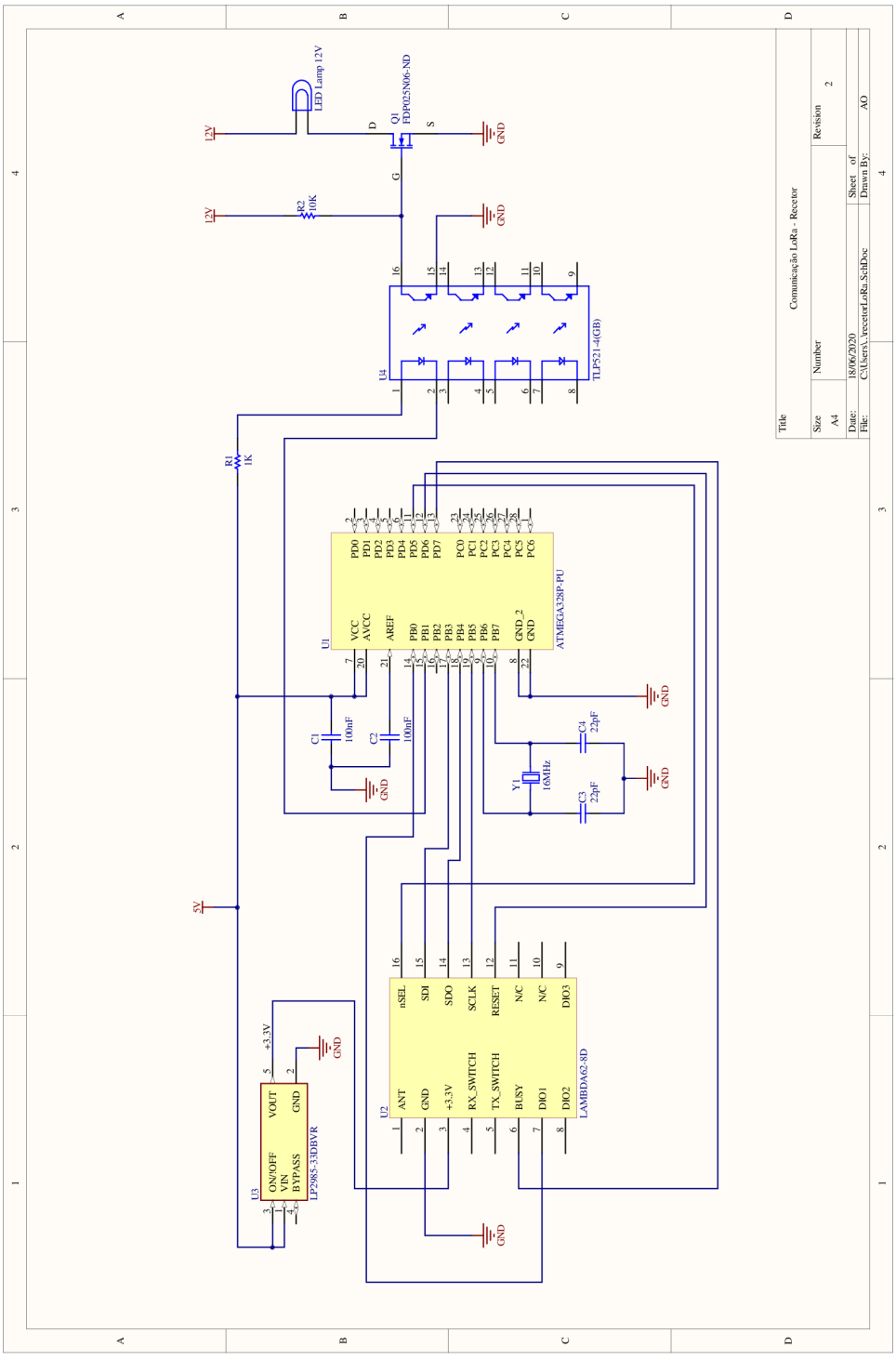


Figura B.1: Esquemático nó recetor LoRa

B.2 Esquemático nó recetor ZigBee

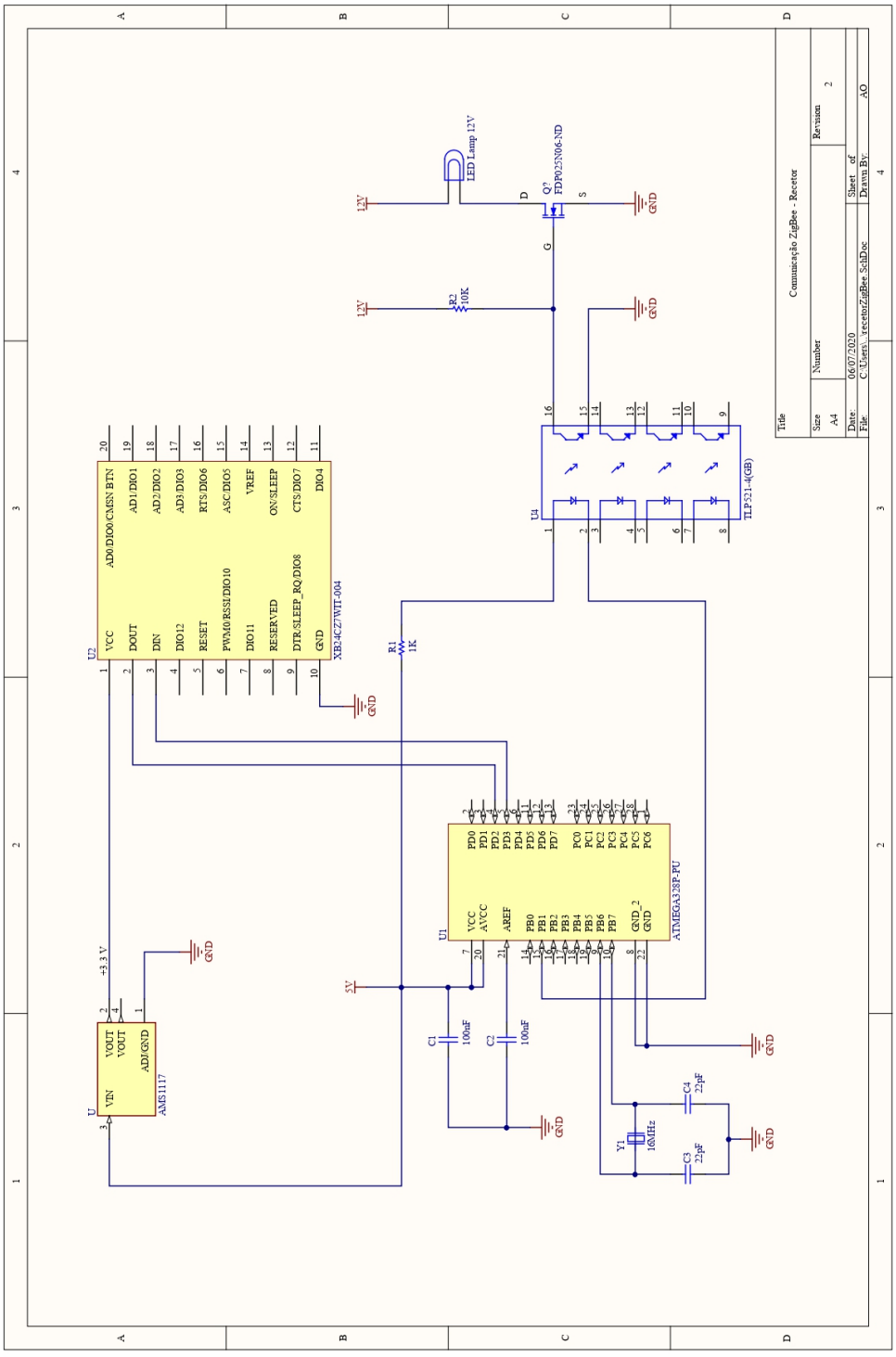


Figura B.2: Esquemático nó recetor ZigBee

B.3 Esquemático nó emissor (LoRa e ZigBee)

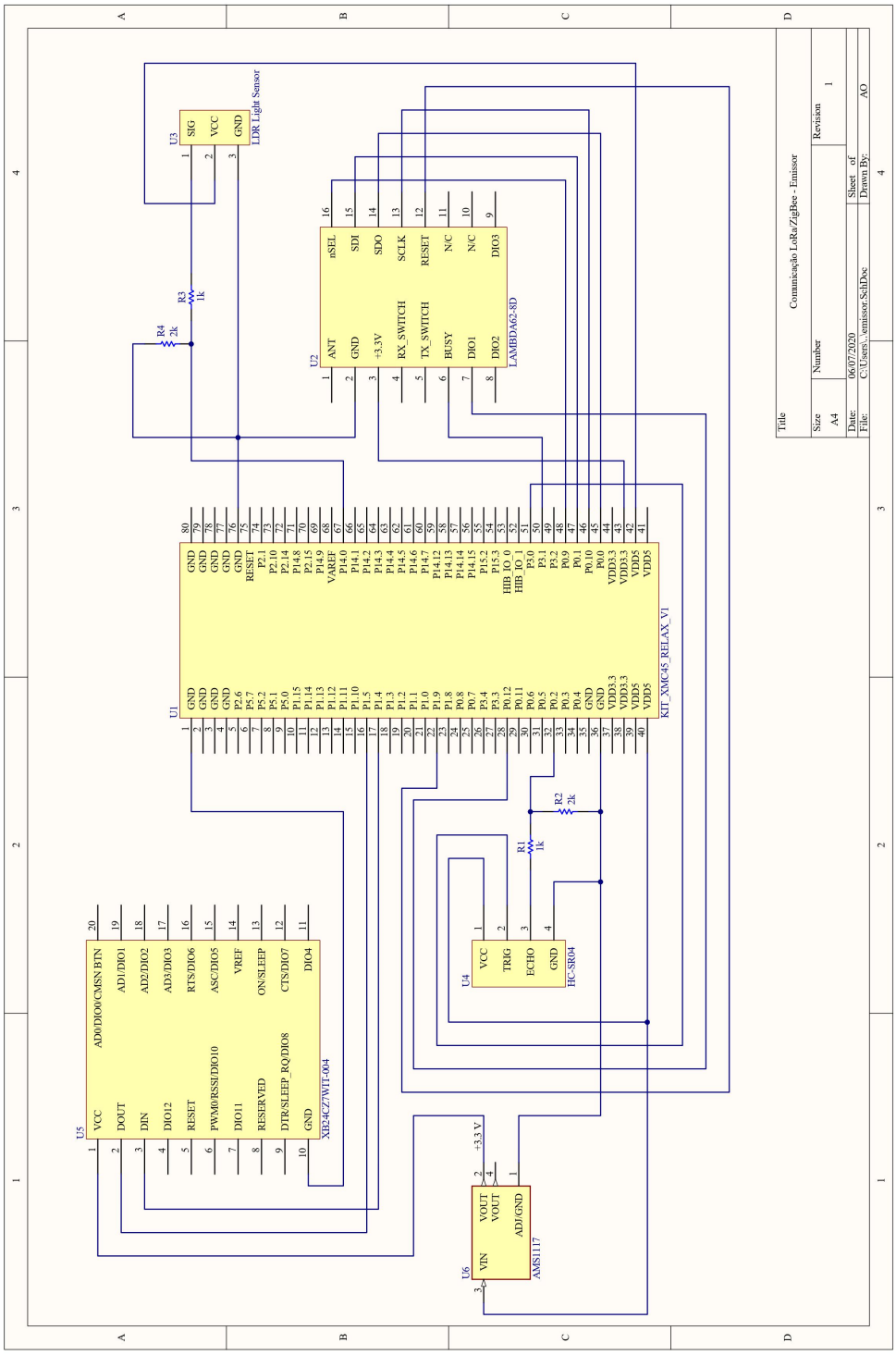


Figura B.3: Esquemático nó emissor (LoRa e ZigBee)

B.4 Nó recetor LoRa - Protótipo real

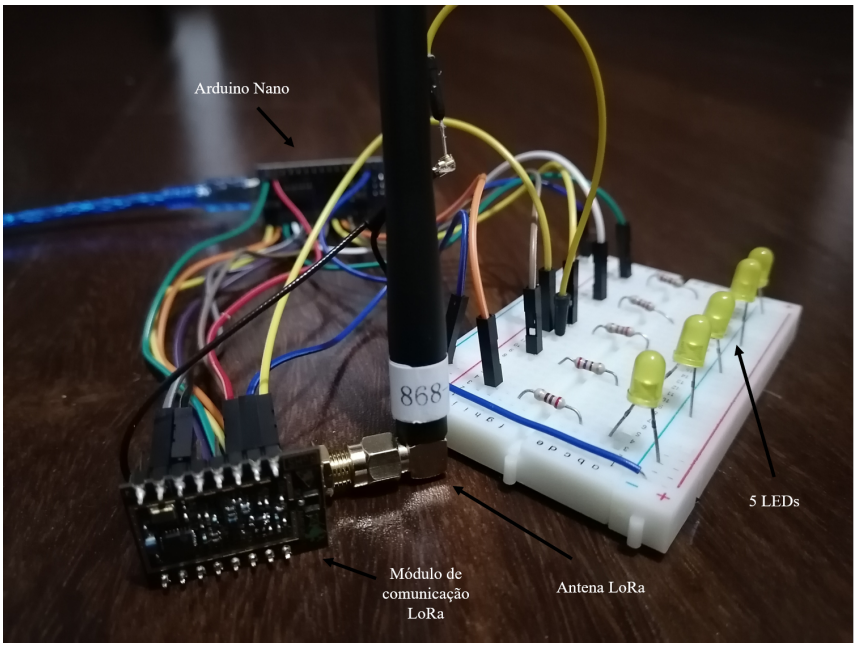


Figura B.4: Nó recetor LoRa - Protótipo real

B.5 Nó recetor ZigBee - Protótipo real

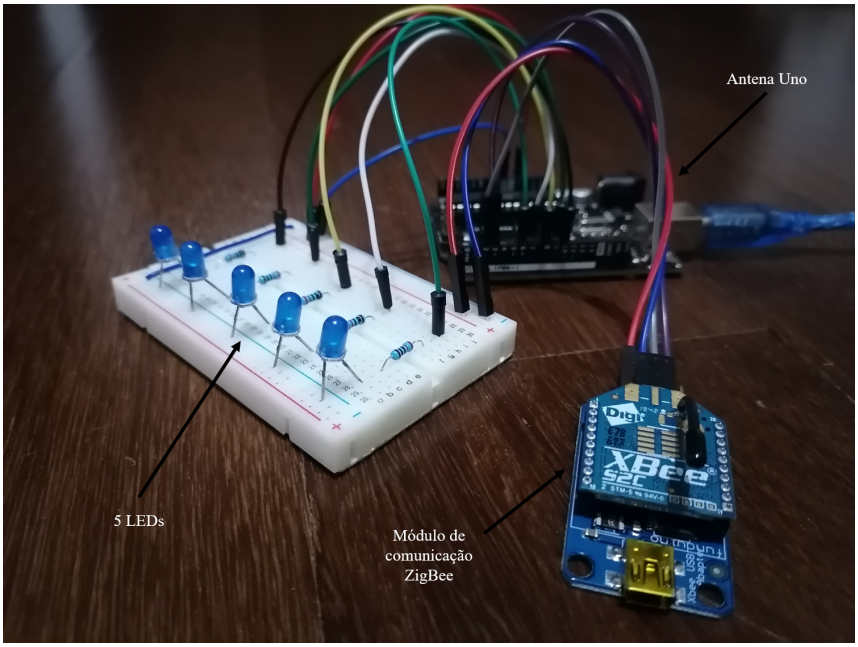


Figura B.5: Nó recetor ZigBee - Protótipo real

B.6 Nó emissor LoRa e ZigBee - Protótipo real

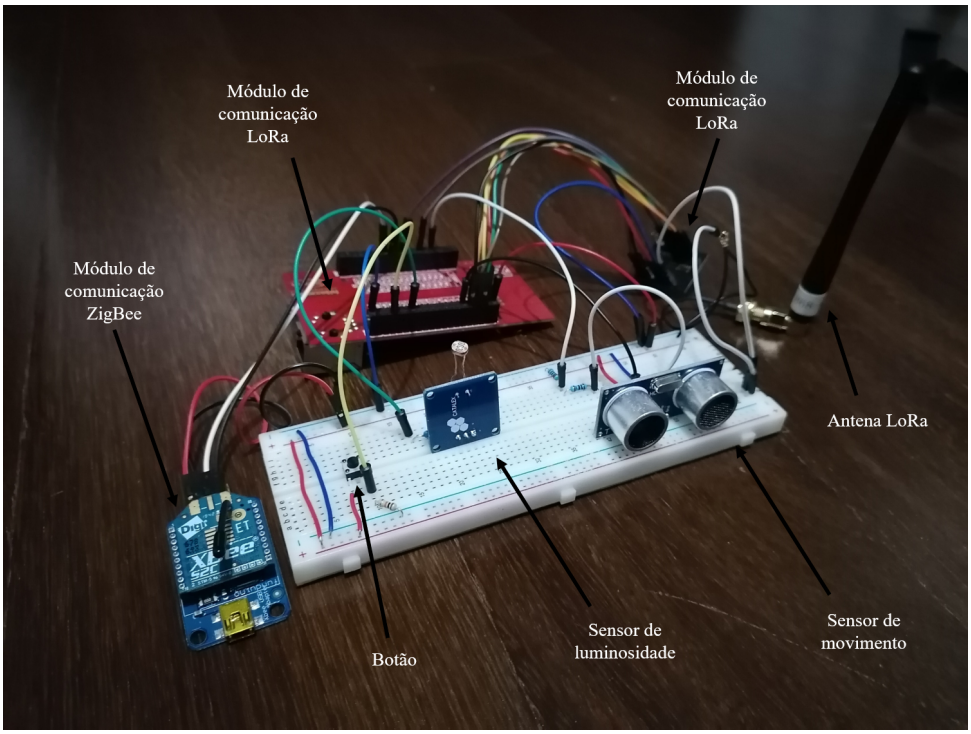


Figura B.6: Nó emissor LoRa e ZigBee - Protótipo real

Anexo C

Software relativo ao protótipo implementado

Fluxogramas dos programas de código, desenvolvidos para cada um dos nós do sistema construído no capítulo 7. Uma vez que as dimensões dos códigos eram grandes de mais para poderem ser alocadas num único fluxograma, neste anexo, são apresentadas várias funções que dividem o código em partes. O fluxograma presente em C.2.2, faz parte tanto do programa de *software* do nó recetor ZigBee, como do programa de *software* do nó recetor LoRa.

C.1 Nó emissor LoRa e ZigBee

C.1.1 Função DelayMicroSeconds(uint32_t delay_val)

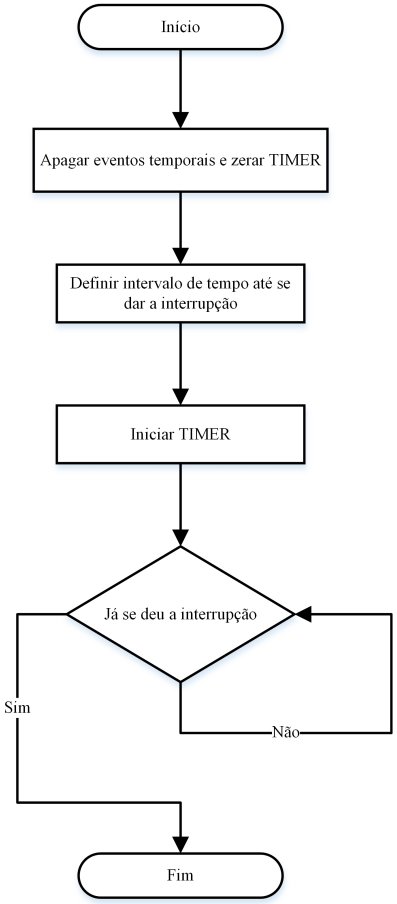


Figura C.1: Função DelayMicroSeconds(uint32_t delay_val)

C.1.2 Função distanceInCentimeters(void)

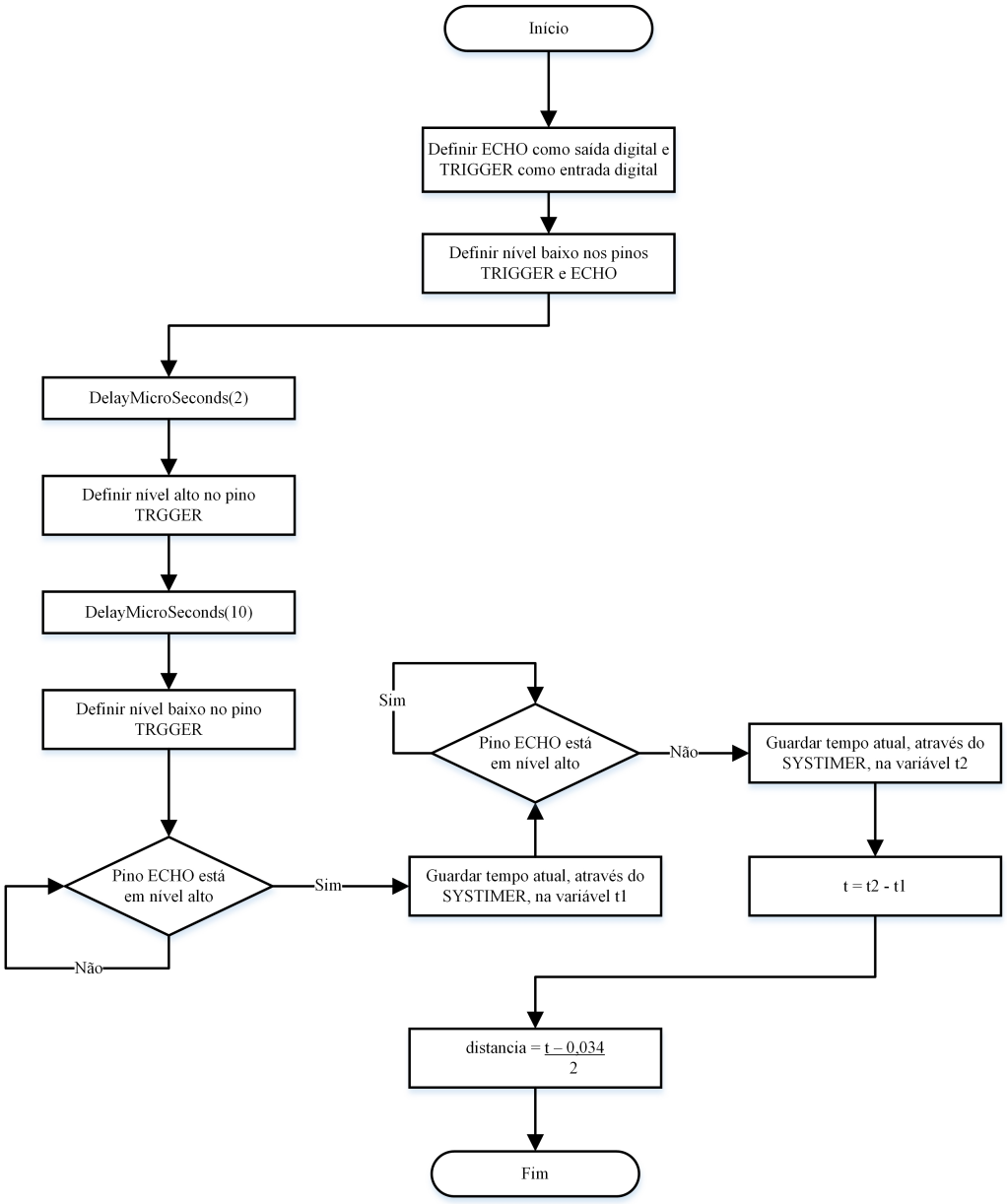


Figura C.2: Função distanceInCentimeters(void)

C.1.3 Função verifyLux(int lum, uint8_t zigbeePacket, uint8_t loraPacket)

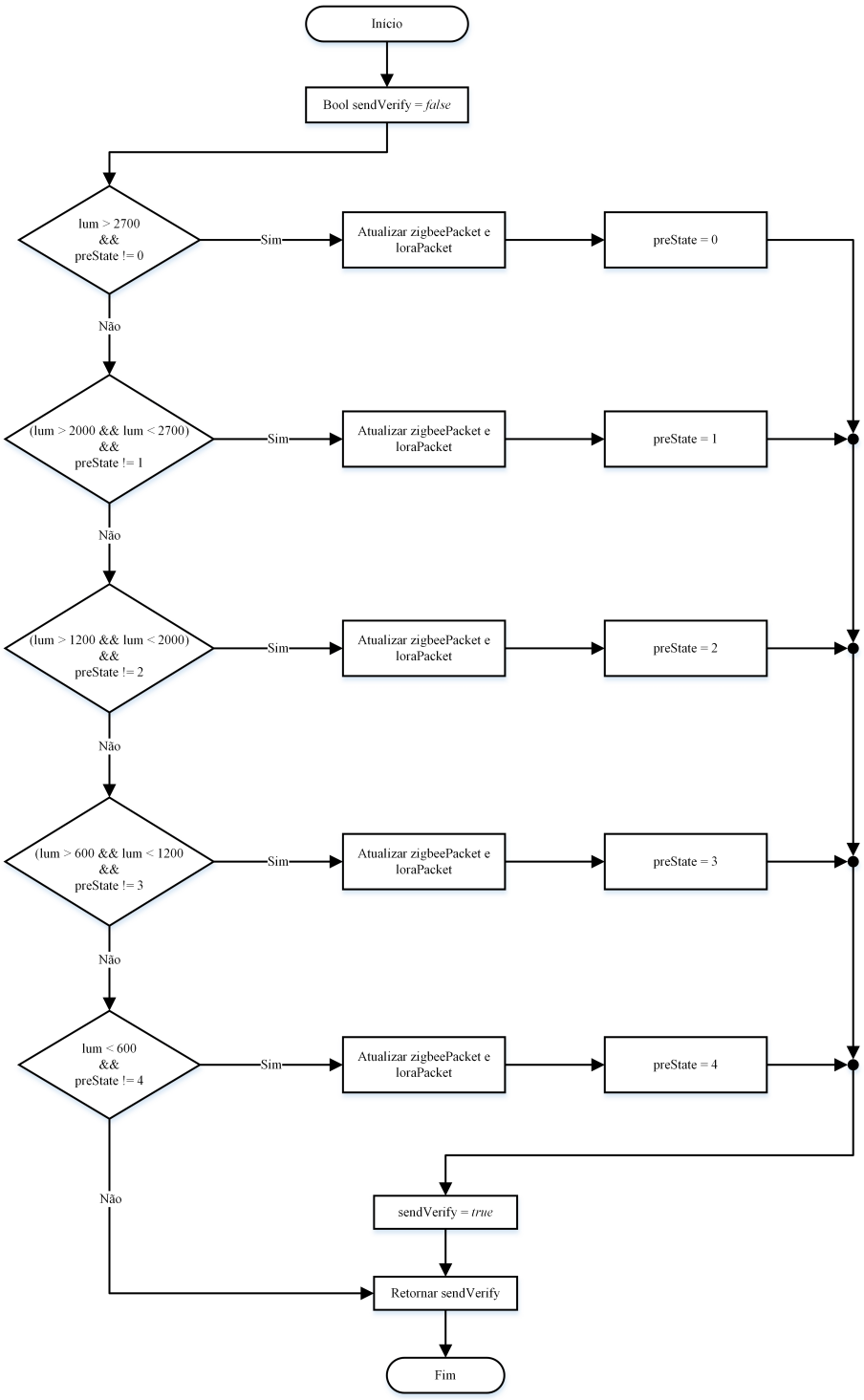


Figura C.3: Função verifyLux(int lum, uint8_t zigbeePacket, uint8_t loraPacket)

C.1.4 Função sendLux(int trigger)

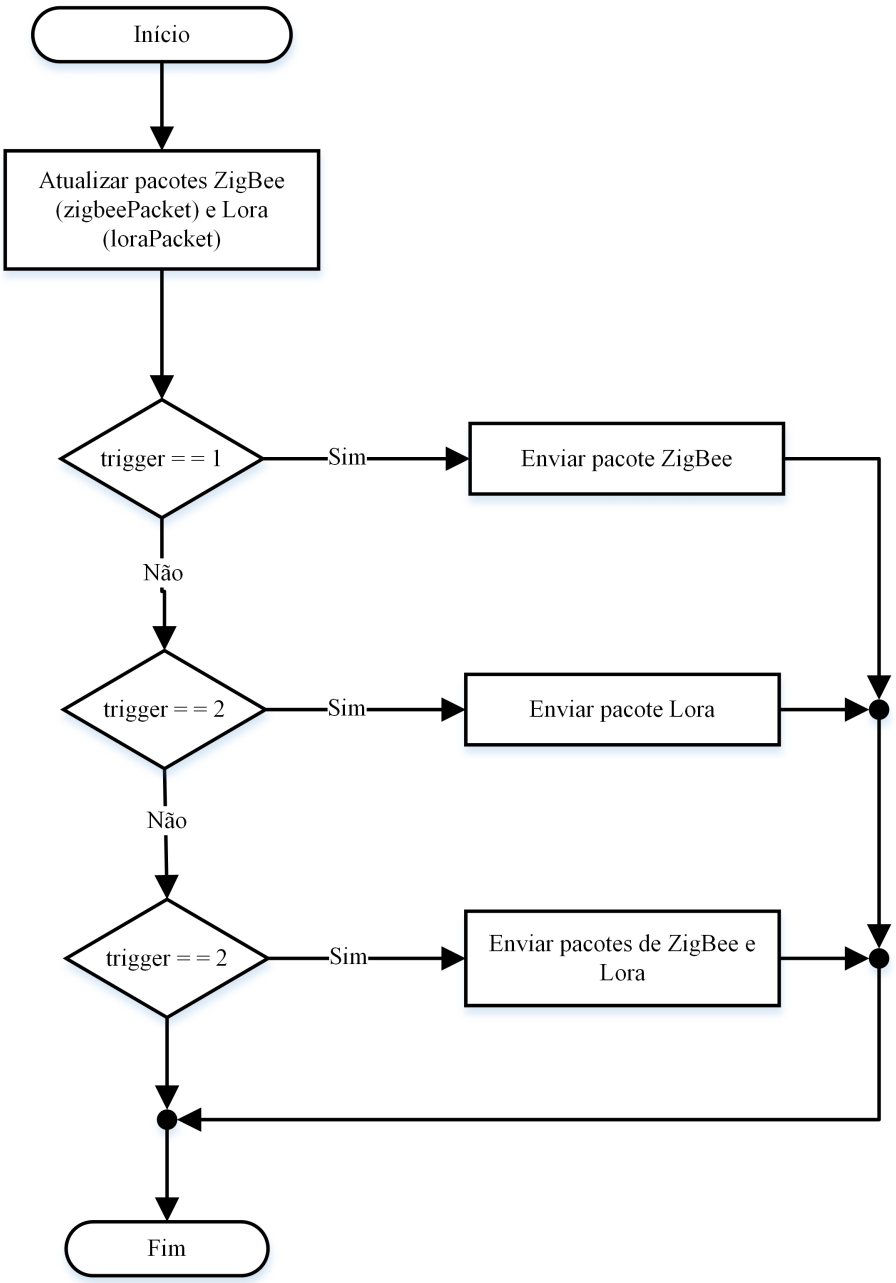


Figura C.4: Função sendLux(int trigger)

C.1.5 Função sendMax(int trig)

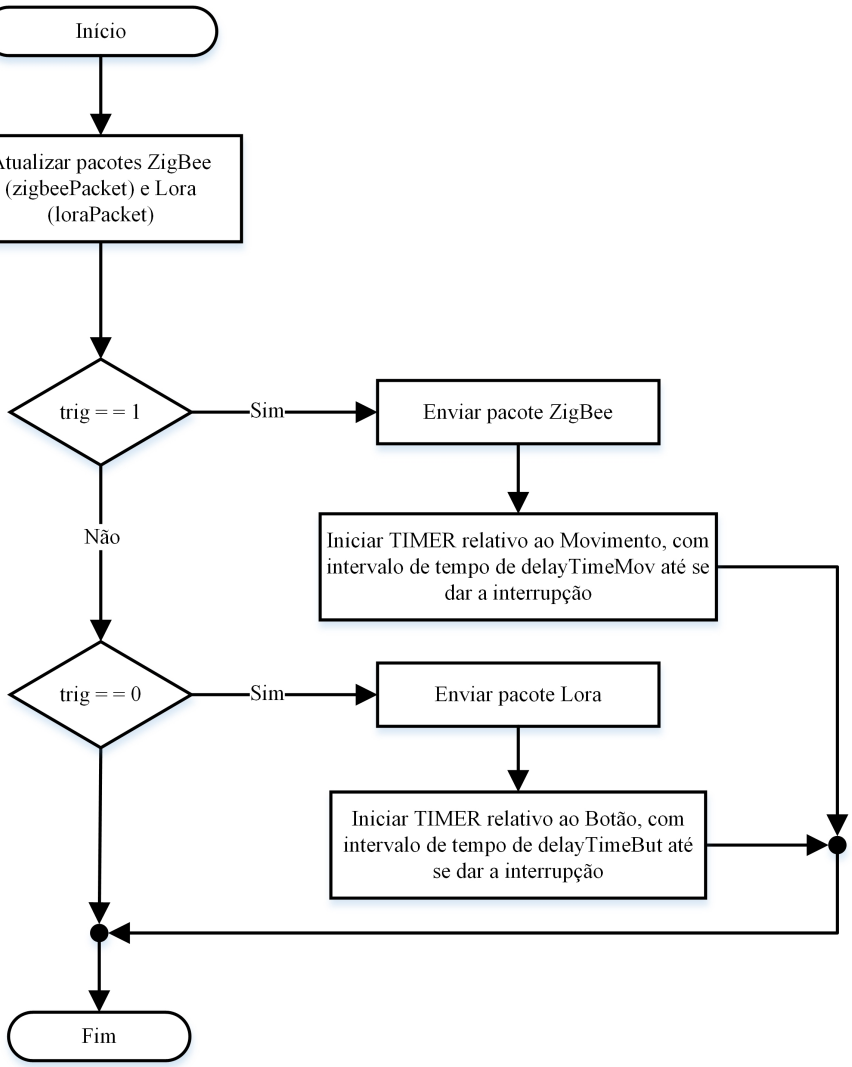


Figura C.5: Função sendMax(int trig)

C.1.6 Função stopMax()

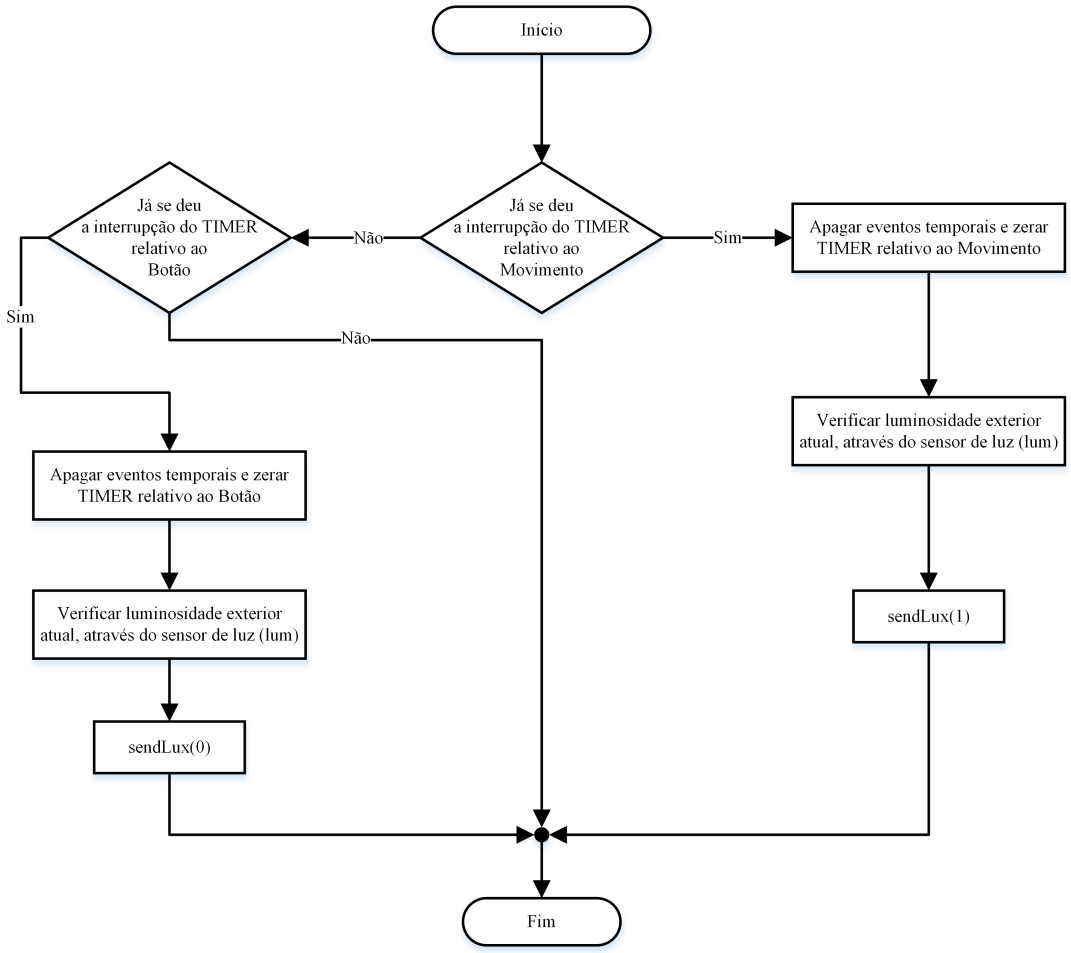


Figura C.6: Função stopMax()

C.1.7 Função main(void) - Parte 1

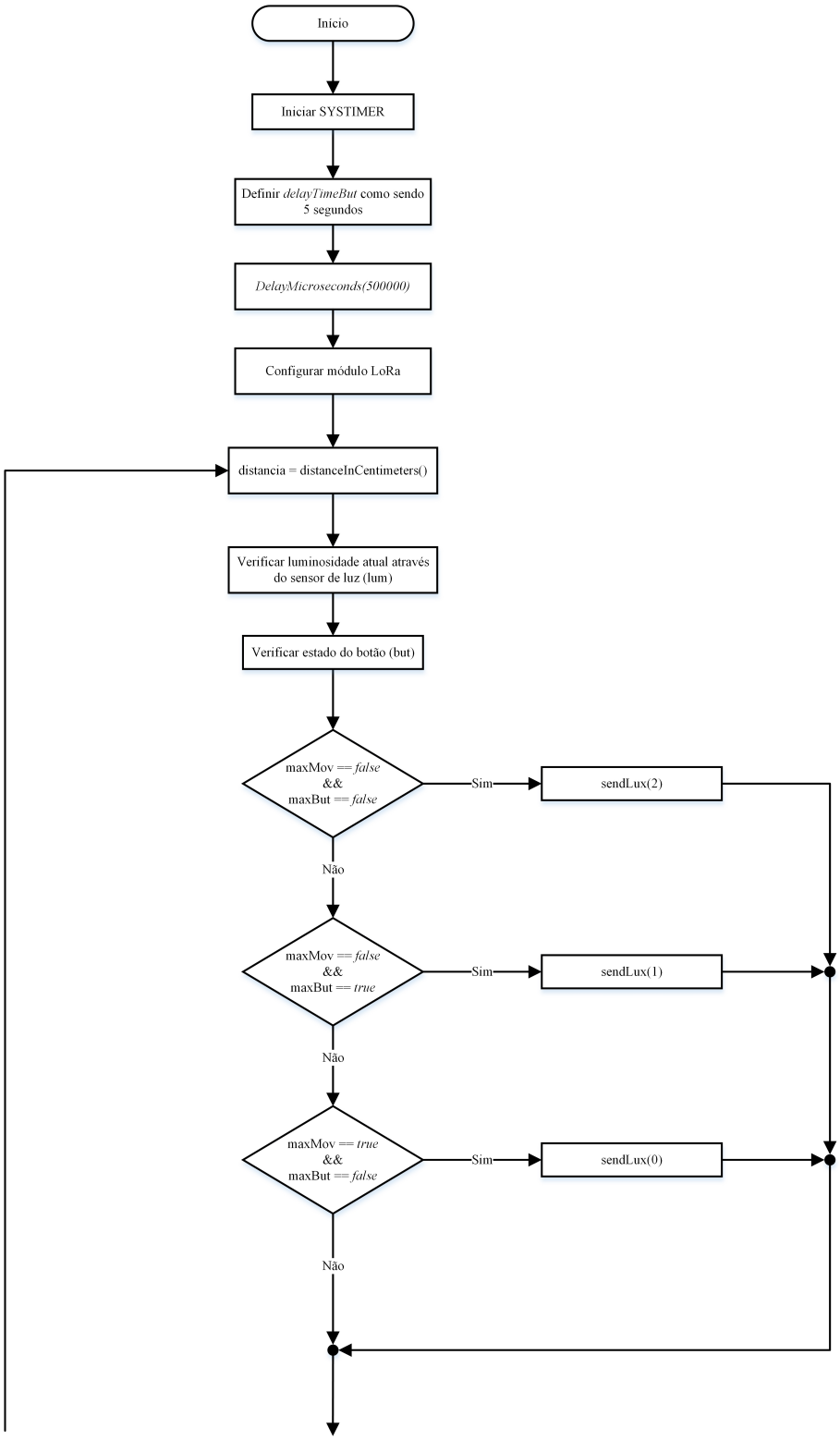


Figura C.7: Função main(void) - Parte 1

C.1.8 Função main(void) - Parte 2

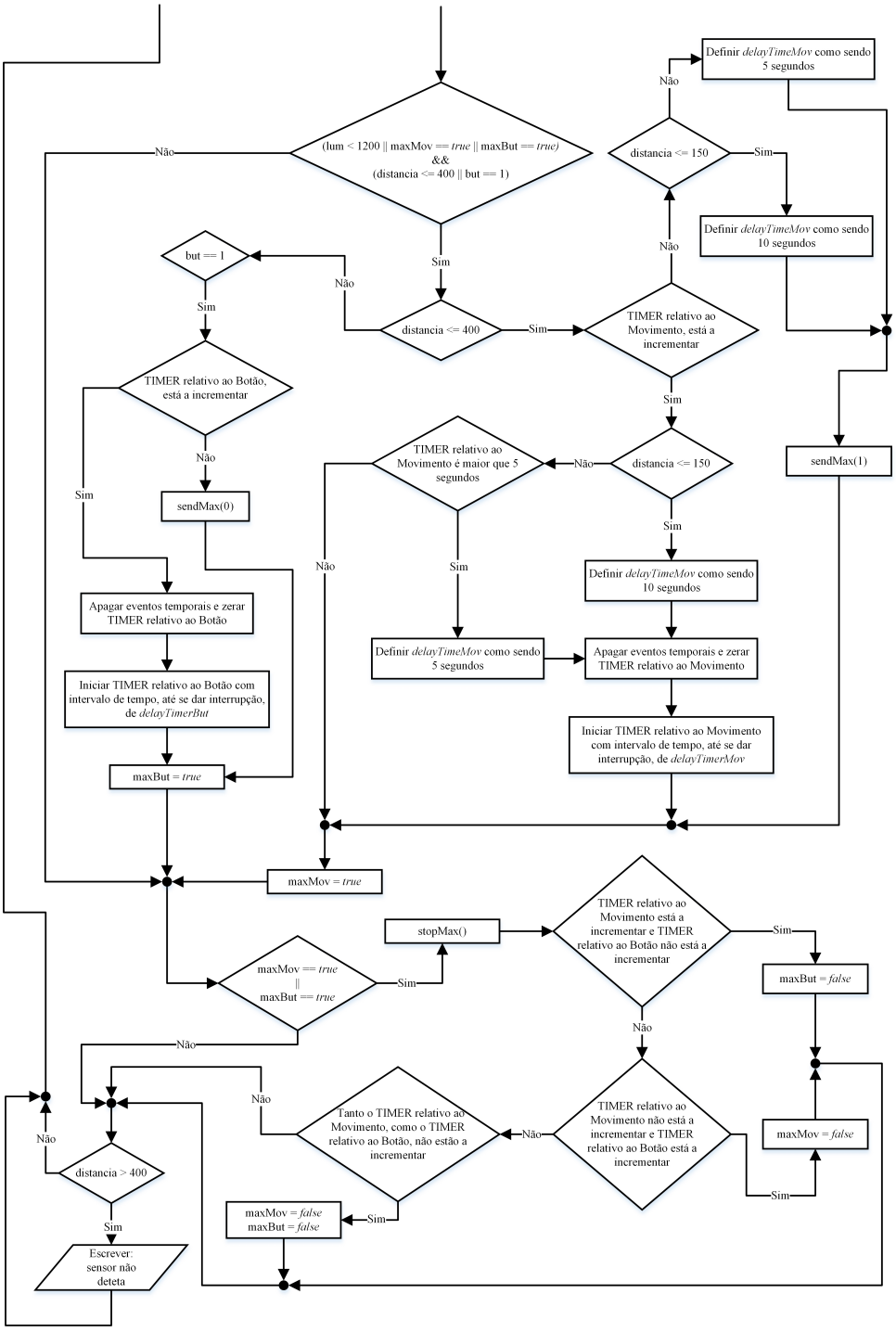


Figura C.8: Função main(void) - Parte 2

C.2 Nó recetor LoRa

C.2.1 Função LoRaReceive()

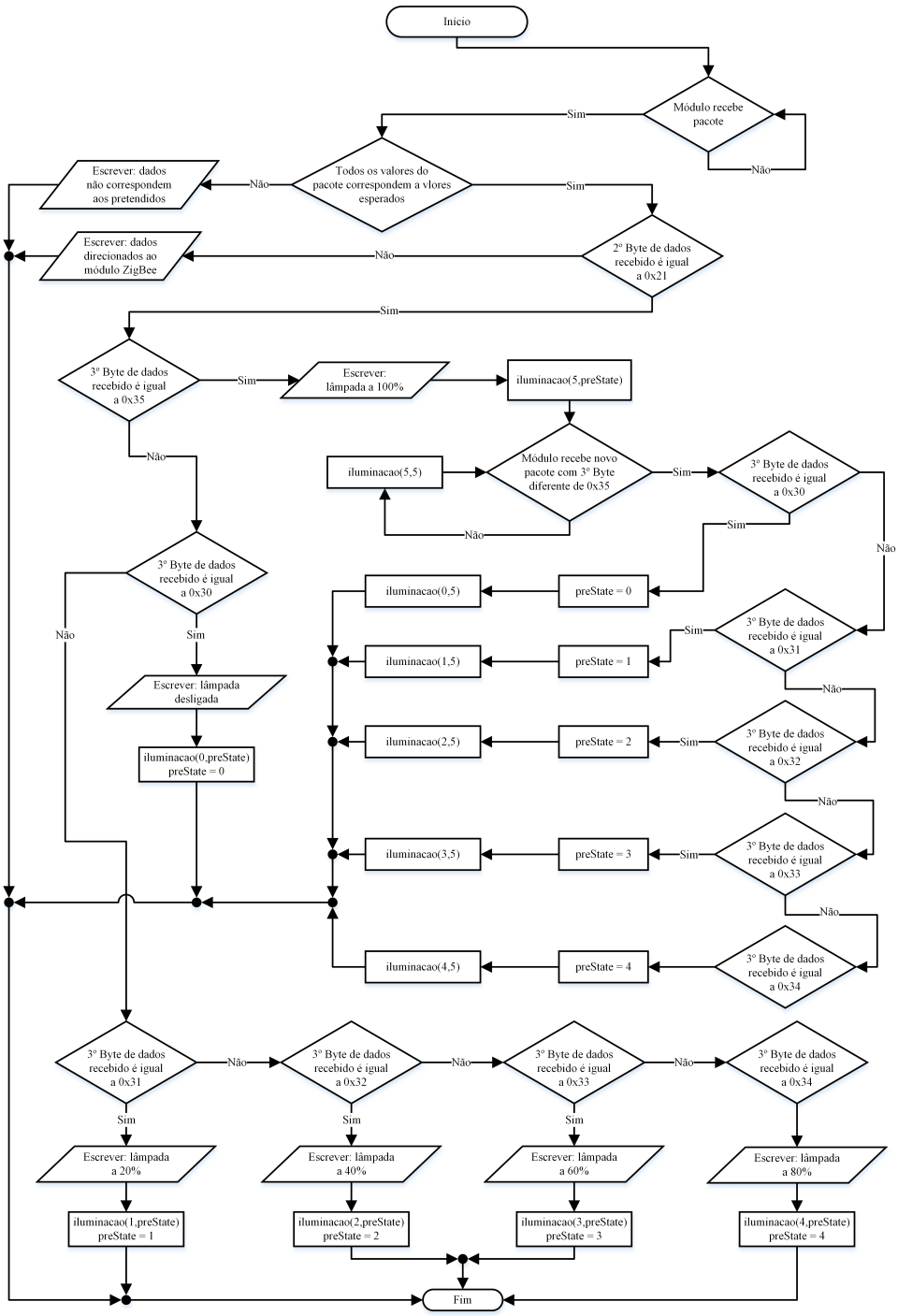


Figura C.9: Função LoRaReceive()

C.2.2 Função iluminacao(int stateValue, int prevStateValue)

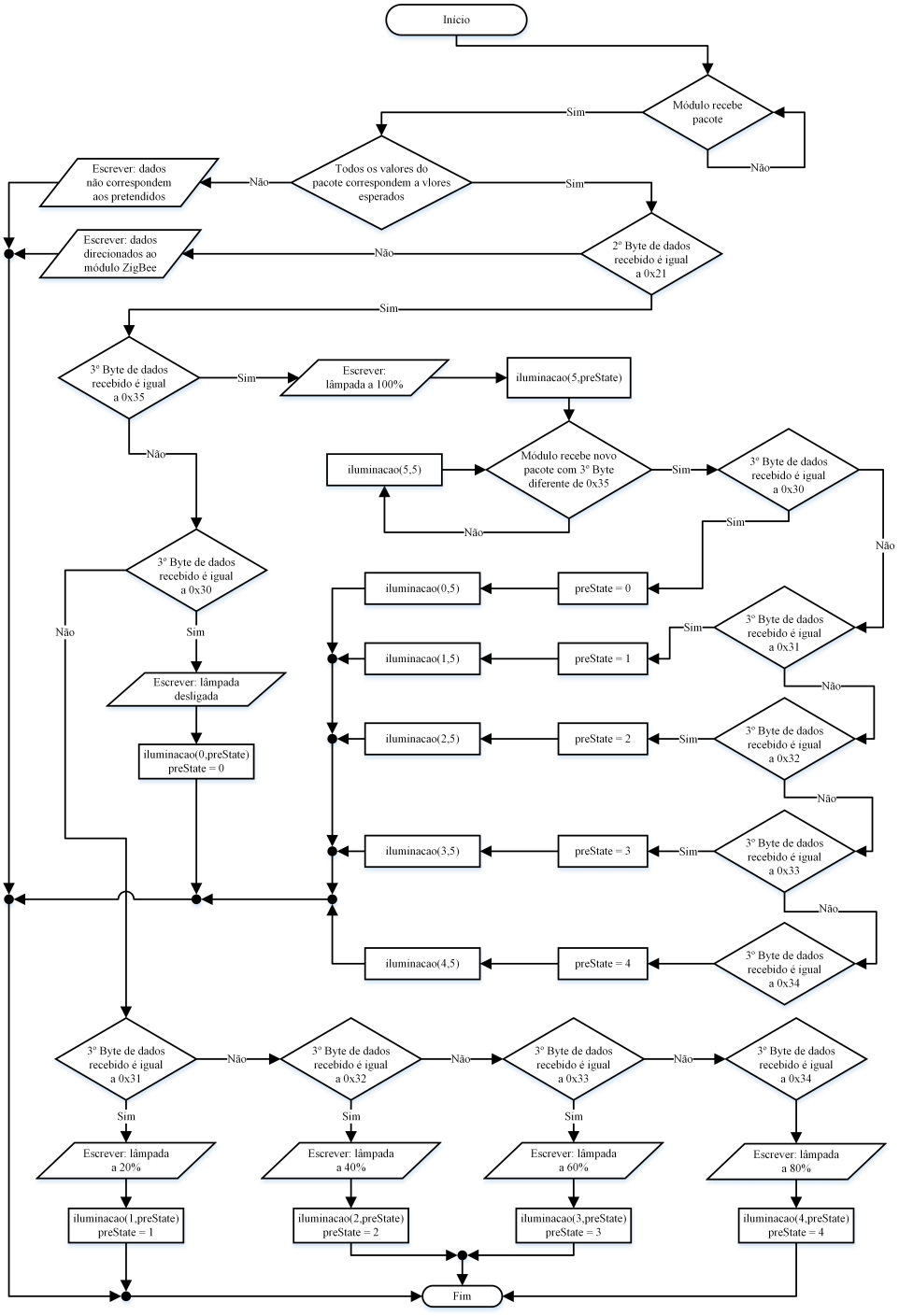


Figura C.10: Função iluminacao(int stateValue, int prevStateValue)

C.2.3 Função setup() - LoRa

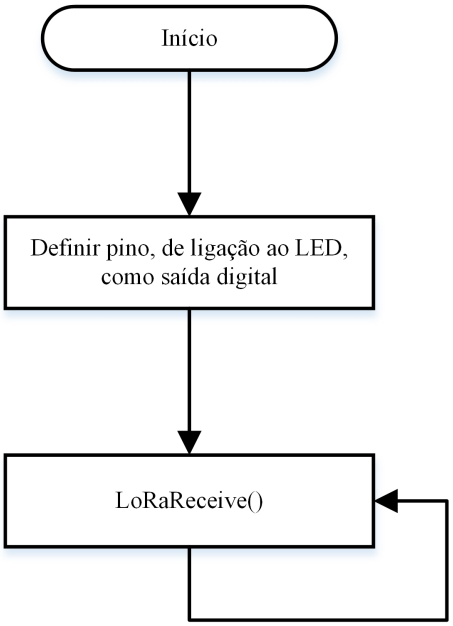


Figura C.11: Função setup() - LoRa

C.3 Nó recetor ZigBee

C.3.1 Função ZigBeeReceive(bool mov)

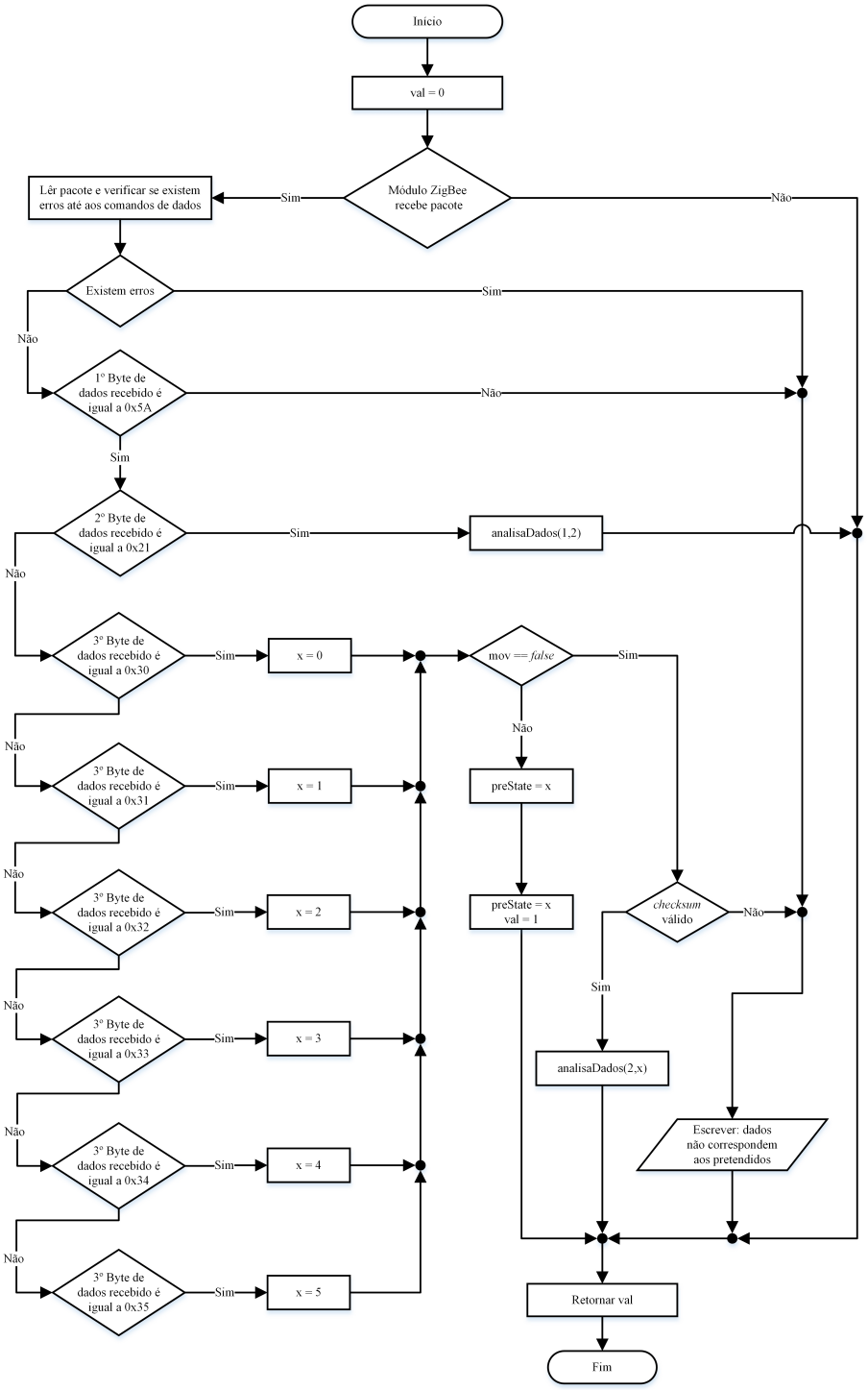


Figura C.12: Função ZigBeeReceive(bool mov)

C.3.2 Função analisaDados(int num, int data)

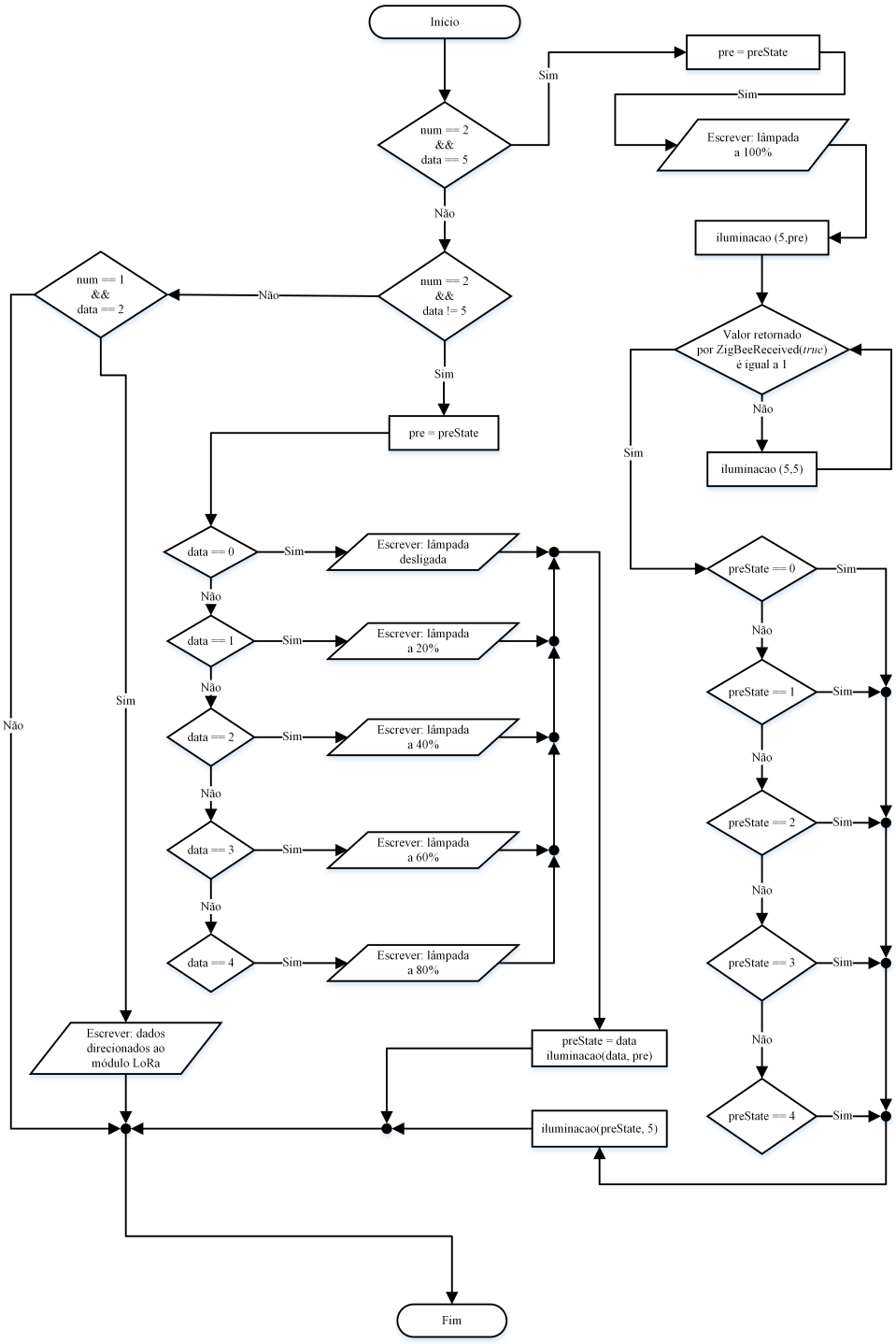


Figura C.13: Função analisaDados(int num, int data)

C.3.3 Função setup() - ZigBee

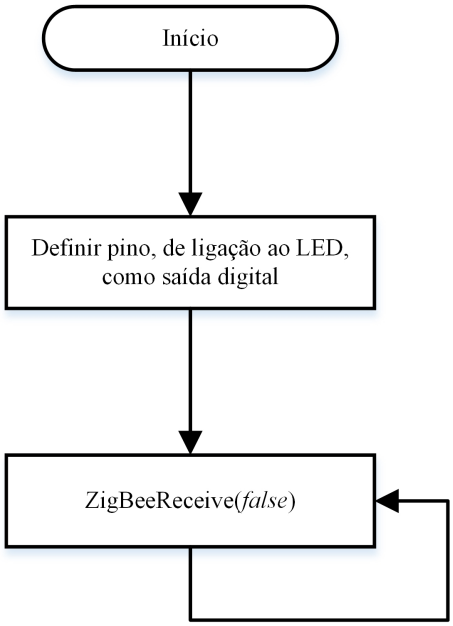


Figura C.14: Função setup() - ZigBee

Anexo D

Imagens dos diferentes testes realizados

Neste anexo encontram-se representadas algumas imagens relativas aos testes efetuados (tanto num ambiente de laboratório, como num ambiente real).

D.1 Testes executados nos escritórios Pavnext

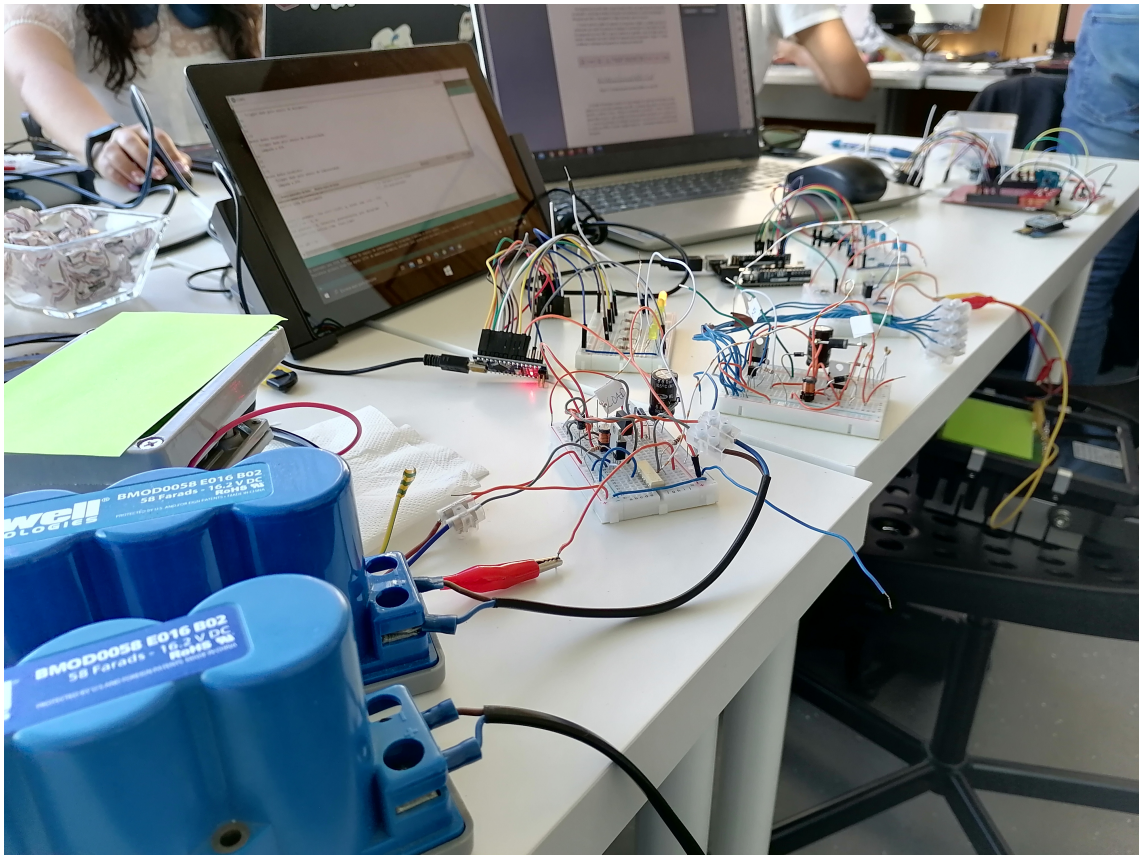


Figura D.1: Testes com os projetores de 12 V

D.2 Testes executados em ambiente real

D.2.1 Nó emissor LoRa e ZigBee



Figura D.2: Testes com os 5 LEDs - Nó emissor

D.2.2 Nós recetores LoRa e ZigBee

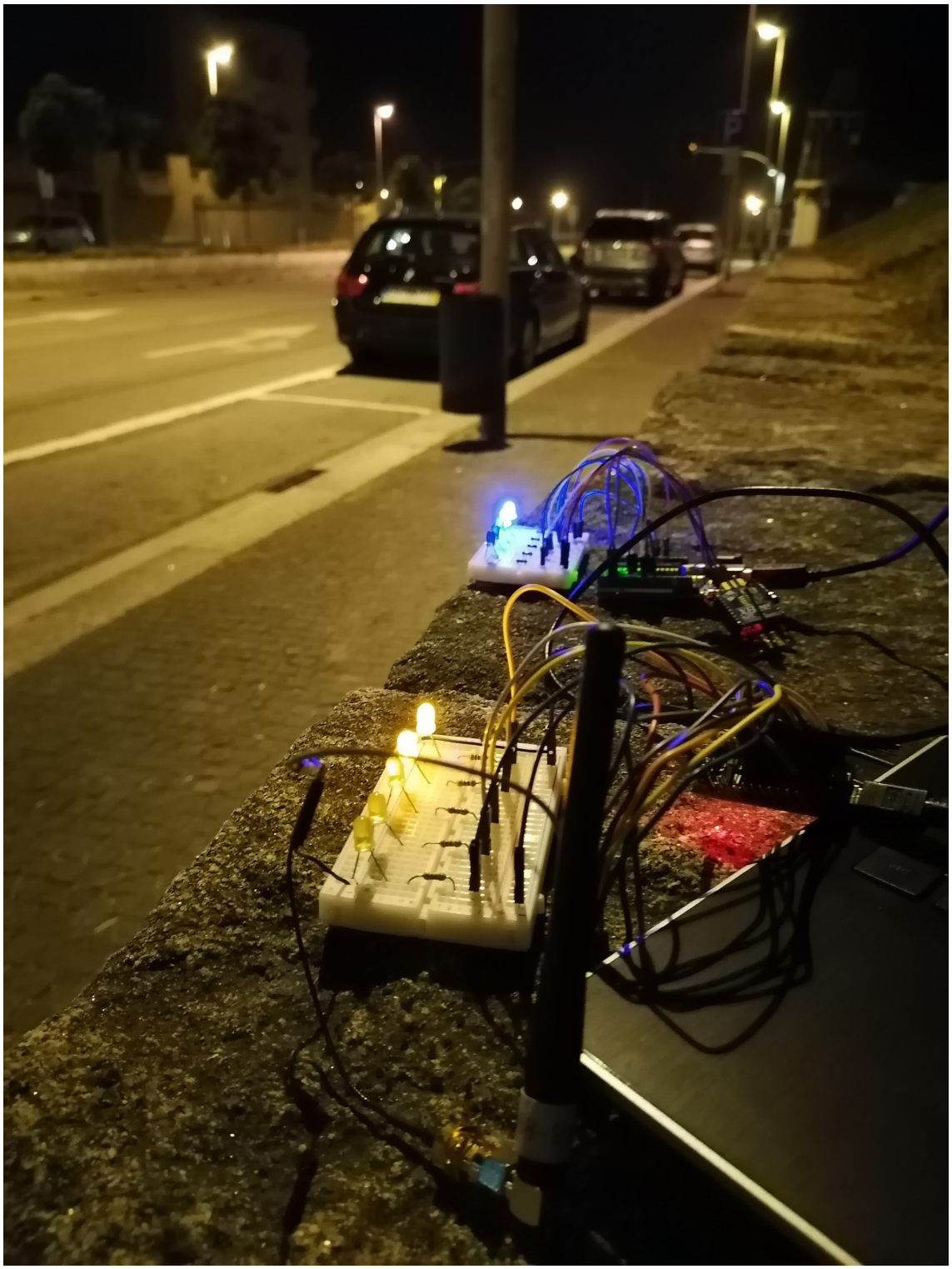


Figura D.3: Testes com os 5 LEDs - Nós recetores

D.2.3 Visão geral da experiência



Figura D.4: Visão geral da experiência

Referências

[1] Yoshiura NFujii YOhta N. Smart street light system looking like usual street lights based on sensor networks. *13th International Symposium on Communications and Information Technologies: Communication and Information Technology for New Life Style Beyond the Cloud, ISCIT 2013*, páginas 633–637, 2013.

[2] Pavnext. Os nossos valores, 2019. URL: https://www.pavnext.com/os-nossos-valores/?lang=pt-pt [último acesso em 27-06-2020].

[3] Andrzej Ożadowicz e Jakub Grela. Energy saving in the street lighting control system—a new approach based on the en-15232 standard. *Energy Efficiency*, páginas 563–576, agosto 2016.

[4] llc northeast group. Global smart street lighting smart cities: Market forecast (2019–2028). abril 2019.

[5] The Climate Group. No need to wait : Accelerating adoption of led street lighting. páginas 1–23, dezembro 2015.

[6] BSI Group, Sharing Cities, e EIP-SCC. Exploiting the 'humble lamp post' a kick start to smart city. páginas 1–8, maio 2017.

[7] PROSPECT. Learning handbook: Public lighting module. páginas 1–31, 2019.

[8] EDP Distribuição. Iluminação pública - um instrumento de cidadania, 2018. URL: https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/historias/iluminacao-publica-um-instrumento-de-cidadania [último acesso em 22-05-2020].

[9] EURACTIV. European cities want 10 million 'smart' streetlamps, março 2017. URL: https://www.euractiv.com/section/digital/news/european-cities-want-10-million-smart-streetlamps/ [último acesso em 02-06-2020].

[10] EDP Distribuição. Manual de iluminação pública. Relatório técnico, outubro 2016.

[11] J.M. Novicky e R. Martinez. Leds para iluminação pública. *Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná - Brasil*, páginas 1–9, 2008.

[12] Emmanuel Loureiro Garrido. Fontes de alimentação para leds ("drivers"). URL: https://paginas.fe.up.pt/~ee03096/index_ficheiros/Page851.htm [último acesso em 19-05-2020].

[13] Luminarias. URL: https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-luminarias-componentes.php [último acesso em 26-07-2020].

[14] Luísa Pinto. Tecnologia led utilizada em 5% dos focos de iluminação pública, setembro 2017. Público, disponível em https://www.publico.pt/2017/09/03/economia/noticia/tecnologia-led-utilizada-em-5-dos-focos-de-iluminacao-publica-1783920.

[15] EDP Distribuição. 600 mil luminárias led instaladas até ao final de 2019, julho 2019. URL: https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/noticias/2019/07/31/600-mil-luminarias-led-instaladas-ate-ao-final-de-2019 [último acesso em 25-05-2020].

[16] Comissão Europeia. New lightbulb rules will enable household energy savings and help reduce greenhouse gas emissions, agosto 2018. URL: https://ec.europa.eu/info/news/new-lightbulb-rules-will-enable-household-energy-savings-and-help-reduce-ghg-emissions-2018-aug-31_en.

[17] VHK (pl)/VITO. Review study on the stage 6 requirements of commission regulation (ec) no 244/2009. páginas 1–142, junho 2013.

[18] UN Environment Programme: UNEP. Time to phase out mercury-added products has arrived, novembro 2019. URL: https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/time-phase-out-mercury-added-products-has-arrived [último acesso em 15-05-2020].

[19] Comissão Europeia. Impact assessment for commission regulation (eu) 2019/2020 pursuant to directive 2009/125/ec. páginas 1–874, outubro 2019.

[20] Electrolube: The Solutions People. Electrolube resolves lens attachment problems with led street lighting, setembro 2019. URL: https://electrolube.com/knowledge_base/electrolube-resolves-lens-attachment-problems-with-led-street-lighting/ [último acesso em 24-07-2020].

[21] Jens Ludwig, Zubin Jelveh, Val Gilbert, Aurélie Ouss, Monica Bhatt, Max Kapustin, Mike Laforest, Monica Deza, John Macdonald, Aaron Chalfin, Benjamin Hansen, Lucie Parker, e Jason Lerner. The impact of street lighting on crime in new york city public housing introduction. páginas 1–125, outubro 2017.

[22] A. Peña-García, A. Hurtado, e M. C. Aguilar-Luzón. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*, 78:142–148, 2015.

[23] Statista Research Department. Estimated LED penetration of the global lighting market from 2010 to 2020, 2019.

[24] Christopher C M Kyba, Theres Kuester, Alejandro Sánchez De Miguel, Kimberly Baugh, Andreas Jechow, Franz Hölker, Jonathan Bennie, Christopher D Elvidge, Kevin J Gaston, e Luis Guanter. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *SCIENCE ADVANCES*, páginas 1–9, 2017.

[25] Iluminação Pública GisWorks. Telegestão, setembro 2019. URL: https://gestoriluminacaopublica.com.br/ [último acesso em 24-07-2020].

[26] Observatório das metrópoles. Smart cities: Solução para as cidades ou aprofundamento das desigualdades sociais?, janeiro 2020. URL: https://www.observatoriodasmetropoles.net.br/smart-cities-solucao-para-as-cidades-ou-aprofundame

nto-das-desigualdades-sociais-texto-para-discussao/?utm_source=Boletim&utm_medium=E-mail&utm_campaign=616&utm_content=Smart+Cities%3A+solu%C3%A7%C3%A3o+para+as+cidades+ou+aprofundamento+das+desigualdades+sociais%3F [último acesso em 24-07-2020].

[27] Smart Cities Network. Cidades mais inteligentes podem ter um retorno do investimento de 60 mil milhões de dólares à escala global, janeiro 2020. URL: http://smart-cities.pt/smn/deloitte-cidades-60mil1601/ [último acesso em 03-06-2020].

[28] Motor24. Schréder escolhe portugal para centro de id para smart cities, abril 2019. URL: https://www.motor24.pt/sites/wattson/schreder-escolhe-portugal-para-centro-de-id-para-smart-cities/599850/ [último acesso em 18-06-2020].

[29] Gareth Owen. 50 million global street lights expected to be connected by 2023, 2019. URL: https://www.counterpointresearch.com/50--million--gl [último acesso em 27-05-2020].

[30] Luís Almeida. Conteúdos da disciplina de arquitetura de computação industrial, mieec. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.

[31] Robert A. Witte. Spectrum and network measurements. *SciTech Publishing*, outubro 2014.

[32] Digilent Blog Ian Etheridge. What is spi? URL: https://blog.digilentinc.com/what-is-spi/ [último acesso em 24-07-2020].

[33] Vida de Silício Daniel Madeira. What is spi?, 2018. URL: https://portal.vidadesilicio.com.br/i2c-comunicacao-entre-arduinos/ [último acesso em 24-07-2020].

[34] Alberto Magalhães José Gouveia. *REDES de Computadores*. FCA - Editora de Informática, Lda, 10.ª edição, 2013.

[35] James Blackman. Lorawan enters 2.4 ghz – plus new space race, network sharing, embedded security, janeiro 2020. URL: https://enterpriseiotinsights.com/20200130/channels/news/lorawan-enters-2-4gh-plus-satellite-boost-network-sharing-embedded-security [último acesso em 25-06-2020].

[36] 3GLTEinfo. Lora architecture. URL: http://www.3glteinfo.com/lora/lora-architecture/ [último acesso em 24-07-2020].

[37] Jonathan Weinert. Which communications platform is best for connected street lighting?, 2019. URL: https://www.interact-lighting.com/global/iot-insights/cellular-vs-rf-mesh-communications [último acesso em 20-06-2020].

[38] Reinhard Müllner e Andreas Riener. An energy efficient pedestrian aware smart street lighting system. *emeraldinsight*, páginas 147–161, fevereiro 2011.

[39] Alex S. Weddell Neil M. White Sei Ping Lau, Geoff V. Merrett. A traffic-aware street lighting scheme for smart cities using autonomous networked sensors. *Computers Electrical Engineering*, páginas 1–25, julho 2015.

[40] Control cabinets for “intelligent street lighting”. Relatório técnico, Siemens, 2013.

[41] Make your city smart again. Relatório técnico, Lumintell.

[42] Lumenia solutions, bring your ideas to light. Relatório técnico, Lumenia, outubro 2018.

[43] Connected lighting for a dynamic city, manage street lighting simply and flexibly with the citytouch connect application. Relatório técnico, Philips, 2016.

[44] Citytouch a conectividade em iluminação urbana. páginas 1–12, janeiro 2015.

[45] Vodafone. Vodafone and philips join forces for connected lighting and smart city services, março 2016. URL: https://www.vodafone.com/business/news-and-insights/press-release/vodafone-and-philips-join-forces-for-connected-lighting-and-smart-city-services [último acesso em 20-06-2020].

[46] Smart street lighting for smart(er) cities. Relatório técnico, Tvilight, julho 2019.

[47] Joe O'Halloran. More than 30 million smart street lights by 2023, predicts study, janeiro 2020. URL: https://www.computerweekly.com/news/252476290/More-than-30-million-smart-street-lights-by-2023-predicts-study [último acesso em 28-05-2020].

[48] Hugo Séneca. Tomar vai avançar com rede lora para criar cidade inteligente, julho 2019. URL: https://visao.sapo.pt/exameinformatica/noticias-ei/mercados/2019-07-03-tomar-vai-avancar-com-rede-lora-para-criar-cidade-inteligente/ [último acesso em 01-06-2020].

[49] Diário da república, 1.ª série — n.º 74. páginas 5–6, abril 2019.

[50] Câmara Municipal de Setúbal. Lâmpadas novas reduzem fatura, março 2019. URL: https://www.mun-setubal.pt/lampadas-novas-nas-escolas-reduzem-fatura/?fbclid=IwAR1-mp_47-MpGlGE73afoaMtUeUX3dee4A8iGdeHiv0SaDGz-_uNFH9jvEA [último acesso em 18-06-2020].

[51] Stacy Fritz e Michelle Lusardi. White paper: "walking speed: the sixth vital sign". *Journal of Geriatric Physical Therapy Vol. 32;2:09*, páginas 3–6, abril 2009.

[52] Pere Tuset-Peiro Borja Martinez Joan Melià-Seguí Thomas Watteyne Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, páginas 1–7, janeiro 2017.

[53] Silicon Laboratories Inc. Key priorities for sub-ghz wireless deployment. páginas 1–6.

[54] LoRa Alliance. A technical overview of lora® and lorawan™. páginas 1–20, novembro 2015.

[55] Semtech. Sx1261/2 long range, low power, sub-ghz rf transceiver. páginas 1–107, dezembro 2017.

[56] Infineon. Xmc4500 microcontroller series for industrial applications. páginas 1–125, dezembro 2017.

[57] The Things Network. Lorawan airtime calculator. URL: https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator [último acesso em 25-06-2020].