



Sistema de promoção de segurança rodoviária para aplicação em passadeiras

DIOGO FERNANDO RIBEIRO FERREIRA PINTO

novembro de 2022

Sistema de promoção de segurança rodoviária para aplicação em passadeiras

Diogo Fernando Ribeiro Ferreira Pinto



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2022

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Diogo Fernando Ribeiro Ferreira Pinto, Nº 1160736,
1160736@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Carla Manuela Alves Pinto, cap@isep.ipp.pt

Empresa: Pavnext - Technological Pavements, Lda

Supervisão: Eng. Francisco Duarte, fd.pavnext@gmail.com



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

23 de outubro de 2022

Agradecimentos

A realização deste projeto demarca uma etapa fundamental de um longo trajeto percorrido, contando com o apoio de diversas pessoas que, direta ou indiretamente, me ajudaram na realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à orientadora do projeto, Professora Carla Pinto, pela sua disponibilidade, incentivo, críticas construtivas e apoio oferecido, que me possibilitaram um crescimento a nível académico e pessoal, permitindo-me ultrapassar as diversas adversidades e exigências, tornando possível a concretização deste projeto.

Agradeço ao Engenheiro Francisco Duarte pela possibilidade de realizar este estágio curricular na empresa Pavnex e por todos os conhecimentos e ajuda prestada.

Agradeço a todos os meus amigos por todos os momentos de diversão e partilha de ideias.

À minha família, nomeadamente à minha mãe e ao meu pai, que sempre estiveram do meu lado e me motivaram ao longo do meu percurso académico.

A todos os meus sinceros agradecimentos.

Diogo Pinto

Resumo

Os acidentes rodoviários causam anualmente 1.3 milhões de mortes, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS). No caso de acidentes não fatais, entre 20 a 50 milhões de pessoas sofrem lesões que poderão resultar num grau de incapacidade parcial ou total.

Este projeto pretende contribuir para uma redução destes números trágicos, apresentando uma solução para promover a segurança rodoviária, de aplicação em passadeiras. Assim, pretende-se desenvolver um sistema que possibilite a deteção de peões e veículos de modo a atuar o sistema de iluminação, através de um conjunto de efeitos luminosos, que possibilitem alertar os condutores para a presença de um peão e, simultaneamente, indicar o sentido de movimento dos peões.

O sistema apresentando pode ser dividido essencialmente em duas redes de controlo: uma rede sem fios a nível local, tendo por base a tecnologia ESP-NOW, que efetua a gestão da informação relativa à sensorização do ambiente em redor da passadeira, nomeadamente a presença de peões e veículos. A segunda é uma rede de comunicação Wi-Fi, que possibilita o envio de informação para um *broker* MQTT, sendo apresentada numa interface gráfica de utilizador.

A solução proposta pretende ser sustentável, sendo-lhe aplicado um sistema de gestão energética, tendo por base a utilização de energias renováveis. É ainda possível efetuar a monitorização da produção e consumo energético do sistema através do módulo de controlo.

Palavras-Chave: Segurança Rodoviária, Passadeira, Peões, Sensores, Sistema de Monitorização.

Abstract

Road accidents cause 1.3 million deaths annually, according to the World Health Organization (WHO). In the case of non-fatal accidents, between 20 and 50 million people suffer injuries that may result in a degree of partial or total disability.

This project intends to develop a system that allows the detection of pedestrians and vehicles, by activating a lighting system, through a set of light effects, which makes it possible to alert drivers to the presence of a pedestrian and, at the same time, indicate the direction of pedestrian movement.

The presented system can be divided essentially into two control networks: a wireless network at the local level, based on ESP-NOW technology, which manages the information related to the sensing of the environment around the crossing, namely the presence of pedestrians and vehicles. The second is a Wi-Fi communication network, which makes it possible to send information to an MQTT broker, presented in a graphical user interface.

The proposed solution aims to be sustainable, applying an energy management system, based on the use of renewable energy. It is also possible to monitor the system's production and energy consumption through the control module.

Keywords: Road Safety, Crosswalk, Pedestrians, Sensors, Monitoring System.

Índice

Agradecimentos	v
Índice	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
Acrónimos	xi
1 Introdução	1
1.1 Breve Descrição da Empresa	1
1.2 Contextualização	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Calendarização	3
1.5 Organização do Relatório	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Cidades Inteligentes	5
2.2 <i>Internet of Things</i>	7
2.3 Comunicação	8
2.3.1 Redes de comunicação cabladas	8
2.3.2 Redes de comunicação sem fios	19
2.4 Sensores	25
2.4.1 Piezoelétricos, Piezoresistivos e Capacitivos	25
2.4.2 Fotoelétricos	26
2.4.3 Ultrassónicos	28
2.5 Sistema de Gestão Energético	30
2.5.1 Energia Solar	30
2.5.2 Armazenamento Energético	31
2.6 Análise de soluções académicas	33

2.6.1	<i>Smart Crosswalk Dynamic Lighting System (SCDLS)</i>	33
2.6.2	<i>Vehicle Detection System for Smart Crosswalks using Sensors and Machine Learning</i>	34
2.6.3	<i>Presence Sensor for People Detection and Reduction of Pedestrian Waiting Time in Traffic Light</i>	35
2.6.4	<i>Pedestrian Traffic Light Control with Crosswalk FMCW Radar and Group Tracking Algorithm</i>	36
2.6.5	<i>Autonomous Pedestrian Crossing in Smart City Environment</i>	38
2.7	Análise de soluções comerciais	39
2.7.1	<i>Smart Crosswalk - LED Solutions</i>	39
2.7.2	<i>Smart Pedestrian Crosswalk - Bercman Technologies</i>	39
2.7.3	<i>SmartPass - Euroasfalt</i>	40
3	Solução Proposta	41
3.1	Análise de requisitos	41
3.2	Arquitetura geral do sistema	42
3.3	Arquitetura de <i>Hardware</i>	44
3.3.1	Controlador do Sistema	44
3.3.2	Sensores	46
3.3.3	Iluminação	49
3.3.4	Comunicação	51
3.3.5	Sistema de Gestão Energético	55
3.4	Arquitetura de <i>Software</i>	55
4	Implementação	59
4.1	<i>Hardware</i>	59
4.1.1	Sensores	61
4.1.2	Iluminação	64
4.2	<i>Software</i>	66
4.2.1	ESP-NOW	68
4.2.2	Iluminação	69
4.2.3	MQTT	70
4.2.4	Interface de Utilizador	71
4.3	Sistema de Gestão Energético	74
5	Resultados	79
5.1	Simulações	79
5.1.1	<i>Force Sensing Resistor</i>	79
5.1.2	Infravermelho	81
5.1.3	Iluminação	82
5.2	Teste de funcionamento do Sistema	84
5.2.1	Cenário 1 - Sentido de Movimento de A para B	84

5.2.2	Cenário 2 - Sentido de Movimento de B para A	85
5.2.3	Cenário 3 - Sentido de Movimento em Ambos os Sentidos	86
5.2.4	Cenário 4 - Detecção de Veículos	87
5.3	Teste da Interface de Utilizador	88
5.3.1	Painel <i>Dashboard</i>	88
5.3.2	Painel de Energia	89
5.3.3	Contagem do número de Peões e Veículos	90
6	Conclusões	91
6.1	Trabalho Futuro	92
	Referências Bibliográficas	93

Índice de Figuras

1.1	Sistema NEXT-road desenvolvido pela Pavnext [1]	2
1.2	Calendarização	3
2.1	População urbana e rural mundial [2]	6
2.2	Objetivos das Cidades Inteligentes [3]	6
2.3	Arquitetura plataforma IoT [4]	7
2.4	Barramento 1-Wire [5]	9
2.5	Barramento LIN [5]	10
2.6	Barramento DMX512 [5]	10
2.7	Pacote UART [6]	11
2.8	Valores mínimos de tensão num barramento RS-485 [7]	12
2.9	Pacote de dados CAN [8]	14
2.10	Linha transmissão diferencial (CAN vs. RS485/422) [8]	15
2.11	Barramento CAN [5]	15
2.12	Barramento I ² C [9]	16
2.13	Exemplo de uma operação de escrita I ² C [10]	17
2.14	Barramento SPI [5]	18
2.15	Exemplo de transmissão de informação via SPI [11]	18
2.16	Consumo energético médio em relação à velocidade de comunicação [12]	21
2.17	Cobertura da rede Sigfox. Azul áreas com serviço disponível e violeta áreas em implementação [13]	24
2.18	Tipos de sistemas de sensorização fotoelétrica [14]	27
2.19	Diagrama de um sistema de medição de distâncias ultrassónico [15]	28
2.20	Sinal de receção ultrassónico ideal e com ruído [15]	29
2.21	Curvas características da célula fotovoltaica: Corrente-Tensão (I-V) e Potência Tensão (P-V). (a) Irradiância Constante (b) Irradiância Variável	31
2.22	Sistema de deteção de peões [16]	35
3.1	Arquitetura da Passadeira Inteligente	43

3.2	Diagrama funcional ESP32 [17]	45
3.3	Resistência vs. Força [18]	46
3.4	Divisor de Tensão	47
3.5	<i>Variable Force Threshold Switch</i>	48
3.6	Circuito de sensorização fotoelétrica <i>thru-beam</i> [19]	49
3.7	Montagem não inversora com polarização inversa	50
3.8	Trama de dados ESP-NOW	52
3.9	Trama de dados ESP-NOW	52
3.10	Arquitetura do Sistema de Gestão Energético	55
3.11	Arquitetura de <i>Software</i> do Módulo de Controlo	56
3.12	Arquitetura de <i>Software</i> do Módulo Periférico	57
4.1	Controlador Principal	60
4.2	Controlador Periférico	61
4.3	Circuito condicionamento de sinal do sensor FSR	62
4.4	Circuito emissor e recetor IR	63
4.5	Circuito relativo à transmissão do sinal PWM	65
4.6	Resposta espectral do sensor TSL2591 [20]	66
4.7	Processo de inicialização e configuração do módulo de controlo	67
4.8	Processo de inicialização e configuração do módulo periférico	68
4.9	Processo de configuração e transmissão de dados da rede ESP-NOW	69
4.10	Processo de configuração e atuação do sistema de iluminação	70
4.11	Processo de inicialização e configuração do protocolo MQTT	71
4.12	Interface de Utilizador - <i>Dashboard</i>	72
4.13	Interface de Utilizador - Energia	73
4.14	<i>Esquema elétrico simplificado do circuito de carregamento de baterias</i> [21]	75
4.15	Perfil típico de carregamento LT8490 [21]	76
4.16	Esquema elétrico do sensor INA219 [22]	76
5.1	Circuito condicionamento de sinal do sensor FSR	80
5.2	Simulação do circuito de condicionamento de sinal do sensor FSR	81
5.3	Circuito condicionamento de sinal do sensor FSR	81
5.4	Simulação do circuito de condicionamento de sinal do sensor FSR	82
5.5	Circuito relativo à transmissão do sinal PWM	83
5.6	Sinal PWM vs Sinal VOUT_A	83
5.7	Sinal VOUT_B	84
5.8	Sentido de movimento de A para B	85
5.9	Sentido de movimento de B para A	86
5.10	Sentido de movimento em ambos os sentidos	87
5.11	Deteção de Veículos	88
5.12	Painel <i>Dashboard</i>	89

5.13 Painel de Energia	89
5.14 Painel de Contagem do número de peões e veículos	90

Índice de Tabelas

2.1	Comparação das diferentes tecnologias cabladas [5]	19
2.2	Comparação das diferentes tecnologias sem fios [23, 24]	25
2.3	Parâmetros de diferentes tipos de bateria [25]	32
2.4	Resultados obtidos nos diferentes cenários [26]	37
3.1	Comparação de diferentes microcontroladores.	44
3.2	Comparação de diferentes sensores digitais de luminosidade.	51

Acrónimos

Acrónimo	Descrição	Página
ACC	<i>Accuracy</i>	34
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	45
ANSR	Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária	2
AUC	<i>Area Under the Curve</i>	34
BFSK	<i>Binary Frequency Shift Keying</i>	29
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>	44
CAN	<i>Controller Area Network</i>	8
CCMP	<i>Counter Mode Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol</i>	51
CS	<i>Chip Select</i>	17
CSMA/CD+AMP	<i>Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection with Arbitration on Message Priority</i>	14
CSS	<i>chirp spread spectrum</i>	22
DC	<i>Direct Current</i>	55
DRL	<i>Deep Reinforcement Learning</i>	34
EIA	<i>Electronics Industries Association</i>	12
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>	12
ESP-IDF	<i>Espressif IoT Development Framework</i>	55
FET	<i>Field-Effect Transistor</i>	16
FMCW	<i>Frequency-Modulated Continuous-Wave</i>	36
FPR	<i>False Positive Rate</i>	34
FSR	<i>Force Sensing Resistor</i>	42
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>	40
GUI	<i>Graphical User Interface</i>	42
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i>	12
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>	8
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	20
IoT	<i>Internet of Things</i>	7
IR	<i>Infrared</i>	42
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>	22
KNN	<i>K-Nearest Neighbor</i>	34

Acrónimo	Descrição	Página
LAN	<i>Local Area Network</i>	20
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>	10
LIN	<i>Local Interconnect Network</i>	8
LoRa	<i>Long Range</i>	19
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>	23
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>	23
LR	<i>Logistic Regression</i>	34
MFCW	<i>Multi-Frequency Continuous Wave</i>	29
MISO	<i>Master In Slave Out</i>	17
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i>	34
MOSI	<i>Master Out Slave In</i>	17
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>	55
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>	51
OMS	Organização Mundial de Saúde	2
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	64
QoS	<i>Quality of Service</i>	53
RAM	<i>Random Access Memory</i>	44
RGB	<i>Red Green Blue</i>	33
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>	34
RF	<i>Random Forest</i>	34
SCL	<i>Serial Clock Line</i>	16
SDA	<i>Serial Data Line</i>	16
SCDLS	<i>Smart Crosswalk Dynamic Lighting System</i>	33
SCLK	<i>Synchronous Clock</i>	17
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>	8
SSL	<i>Secure Sockets Layer)</i>	53
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	54
TFCW	<i>Two Frequency Continuous Wave</i>	29
ToF	<i>Time of Flight</i>	29
TPR	<i>True Positive Rate</i>	34
TSF	<i>Time Series Forecasting</i>	34
TSL	<i>Transport Layer Security</i>	53
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>	8
WPA	<i>Wi-Fi Protected Access</i>	20
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>	20

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório é efetuada uma breve descrição da empresa, a contextualização e objetivos do projeto, bem como a calendarização e organização da dissertação.

1.1 Breve Descrição da Empresa

A Pavnext desenvolve soluções tecnológicas no âmbito da promoção da segurança rodoviária, apresentando como produto principal um equipamento para aplicação na superfície de pavimentos rodoviários. Esta tecnologia, denominada NEXT-road (Fig. 1.1), permite reduzir a velocidade de circulação de um veículo sem ação do condutor e sem causar impacto no veículo, possibilitando converter a energia cinética relativa à redução da velocidade em energia elétrica com uma elevada eficiência. Esta energia pode ser depois usada na iluminação de passadeiras, semáforos, sensores ou ser injetada na rede elétrica. Além disso, possibilita ainda gerar dados de tráfego em tempo real, com a possibilidade de serem enviados para a *cloud* de modo a serem analisados [27, 28].

A promoção da segurança rodoviária para aplicação em passadeira também é uma temática abordada, sendo que a Pavnext desenvolveu um sistema que possibilita a aplicação de um novo tipo de marcadores LED no pavimento, permitindo criar efeitos luminosos para sinalizar o sentido de movimento dos peões e ciclistas que se encontram a atravessar a passadeira, bem como a sinalização da passadeira para os veículos que se aproximam [28].

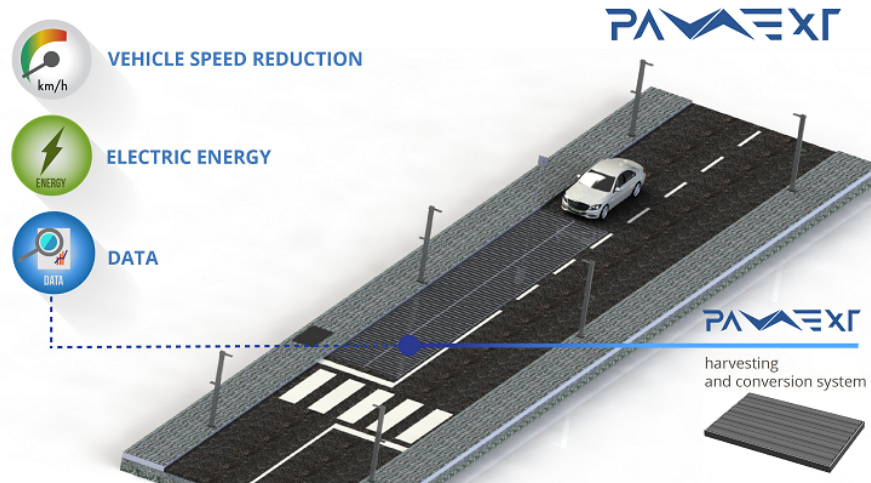


Figura 1.1: Sistema NEXT-road desenvolvido pela Pavnex [1]

1.2 Contextualização

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), os acidentes rodoviários causam anualmente 1.3 milhões de mortes. No caso de acidentes não fatais, entre 20 a 50 milhões de pessoas sofrem lesões que poderão resultar num grau incapacidade parcial ou absoluta [29].

A nível nacional, segundo o relatório de sinistralidade de junho de 2022, disponibilizado pela ANSR (Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária), observou-se uma subida de 35.2 % do número de acidentes por atropelamentos, resultando num acréscimo de 28.6 % nas respetivas vítimas mortais, comparativamente aos dados obtidos no mês homólogo do ano anterior [30].

No âmbito desta temática, é proposto o desenvolvimento de um sistema de deteção de peões, possibilitando atuar um sistema de iluminação de modo a criar efeitos luminosos que indiquem o seu sentido de movimento. Deste modo, o projeto envolve a caracterização de diferentes parâmetros, relacionados com o sensorização de peões, a natureza dos dados a comunicar e os efeitos luminosos, de modo a tornar o local de implementação da passadeira mais seguro.

1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação envolve o desenvolvimento de um sistema de sensorização de peões e veículos. Deste modo, os principais objetivos para o desenvolvimento do projeto são:

- Desenvolvimento de um sistema capaz de efetuar a detecção de peões e veículos;
- Efetuar o controlo da iluminação de acordo com um conjunto de efeitos luminosos que possibilitem a indicação da direção de movimento de peões;
- Controlo da intensidade luminosa do sistema de iluminação;
- Estabelecer um sinal de aviso luminoso para veículos de modo a alertar a presença de uma passadeira;
- Desenvolvimento de uma rede local que possibilite a sincronização entre os diferentes dispositivos de sensorização;
- Desenvolvimento de uma rede que possibilite a comunicação com um servidor externo para apresentação de informação numa interface gráfica de utilizador;
- Efetuar a alimentação de todo o sistema tendo por base a utilização de energias renováveis, bem como o respetivo armazenamento e monitorização.

1.4 Calendarização

A organização das diferentes etapas de desenvolvimento do projeto e da dissertação é apresentada em diferentes fases: estado da arte, desenvolvimento da arquitetura do sistema, implementação do sistema, testes e resultados e elaboração da dissertação, conforme pode ser observado na figura 1.2.

Tarefa	2022							
	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Estado da Arte								
Desenvolvimento da Arquitetura do Sistema								
Implementação do Sistema								
Testes e Resultados								
Elaboração da dissertação								

Figura 1.2: Calendarização

1.5 Organização do Relatório

O documento apresentado encontra-se dividido em seis capítulos, descrevendo o desenvolvimento completo do projeto.

No primeiro capítulo é efetuada uma breve descrição da empresa, os principais objetivos delineados e calendarização relativa ao desenvolvimento do projeto.

O segundo capítulo apresenta-se o estudo de um conjunto de tecnologias relacionadas com redes de comunicação, sensores, sistema de gestão energética e análise de soluções académicas e comerciais.

No terceiro capítulo é efetuada a apresentação da solução proposta, sendo efetuada a análise de requisitos e descrição de um conjunto possível de soluções relacionadas com os diferentes componentes do sistema.

O quarto capítulo envolve a implementação da solução proposta, sendo efetuada a descrição da solução final.

O quinto capítulo aborda os principais resultados obtidos através da realização de testes de funcionamento do sistema.

O sexto capítulo apresente as considerações finais e os aspetos de possíveis melhorias a desenvolver num trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo é efetuada uma abordagem às tecnologias inerentes ao projeto que se pretende desenvolver. Na primeira e segunda secção aborda-se a temática relativa às cidades inteligentes e Internet of Things. Na terceira secção apresenta-se as tecnologias referentes a redes de comunicação cabladas e sem fios. De seguida, é efetuada uma abordagem relativa à sensorização do sistema e sistema de gestão energético. Por fim, é efetuada uma análise de soluções académicas e comerciais relativas à temática do projeto.

2.1 Cidades Inteligentes

O crescimento da população mundial a viver em ambientes urbanos ocorre a um ritmo acelerado, sendo que, em 2018, 55% da população do mundo residia em áreas urbanas. A previsão, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), é de que em 2050 cerca de 68% da população mundial viverá em cidades [2]. Na figura 2.1 é possível observar a variação da população a viver em meios urbanos e rurais.

O crescimento abrupto evidenciado induz um vasto leque de questões relacionadas com a manutenção da qualidade de vida em áreas urbanas e mitigação do impacto das alterações climáticas, dado que as cidades são o cerne da economia mundial e, por isso, responsáveis por mais de 70% das emissões de gases de efeito de estufa [31]. De modo a responder aos desafios anteriormente descritos, surge o conceito de Cidades Inteligentes (*Smart Cities*) [32].

As Cidades Inteligentes podem ser definidas como sistemas urbanos que utilizam as tecnologias de informação e comunicação de modo a tornar as infraestruturas e serviços públicos mais interativos, acessíveis e eficientes. Assim, as aplicações possíveis de serem efetuadas variam desde a gestão do tráfego rodoviário-

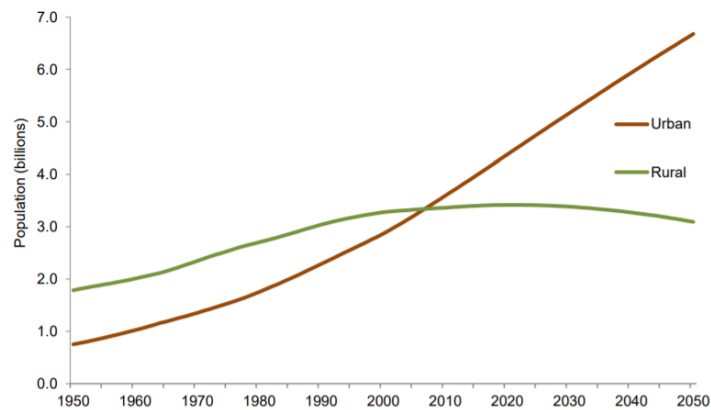


Figura 2.1: População urbana e rural mundial [2]

rios e peões, monitorização das redes de distribuição de água e energia, bem como áreas da saúde, ambiente e serviços públicos. As aplicações inerentes às cidades inteligentes apresentam diversos benefícios aos cidadãos e respetivo ambiente, como é possível observar na figura 2.2 [3].

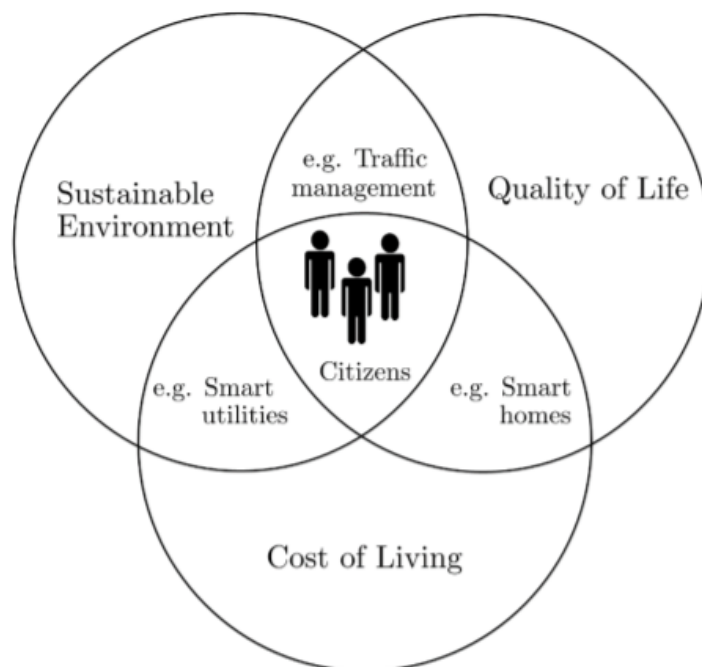


Figura 2.2: Objetivos das Cidades Inteligentes [3]

2.2 Internet of Things

A Internet das Coisas (IoT) é um paradigma emergente que possibilita a interconectividade entre dispositivos eletrônicos e sensores através da rede Internet, de modo a responder a diversos desafios relacionados com áreas relativas à indústria, negócios, logística, monitorização ambiental e serviços de saúde. O termo Internet das Coisas não apresenta uma definição única, apresentando-se como um conjunto de definições atribuídas por pessoas relacionadas com a área da investigação, ensino e indústria [33, 34]. Deste modo, a abordagem do conceito de IoT pela ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*), na recomendação Y.2060, apresenta a seguinte definição [35]:

“A global infrastructure for the information society enabling advanced services by interconnecting (physical and virtual) things based on, existing and evolving, interoperable information and communication technologies”

O desenvolvimento de sistemas IoT envolve, *a priori*, a seleção de um conjunto de componentes base do sistema, abordando questões relacionadas com a escolha do sensor mais adequado, protocolos de comunicação, plataformas de armazenamento de informação e o tipo de computação mais adequada para a respetiva aplicação [4]. Na figura 2.3 é possível observar os diferentes componentes existentes em plataformas IoT.

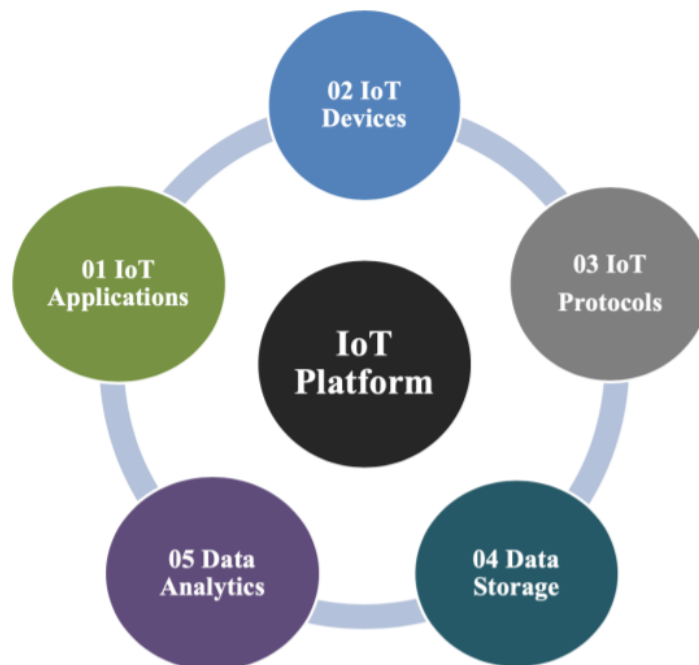


Figura 2.3: Arquitetura plataforma IoT [4]

2.3 Comunicação

A comunicação entre dispositivos pode ser dividida entre duas principais vertentes: redes de comunicação cabladas e redes de comunicação sem fios. Deste modo, ao longo deste capítulo é efetuada uma abordagem de diferentes protocolos e normas utilizadas em redes de comunicação com fios e redes de comunicação sem fios.

2.3.1 Redes de comunicação cabladas

As redes de comunicação cabladas apresentam como principal característica o facto de recorrerem a fios para estabelecerem a comunicação entre dispositivos. O meio em que se inserem os dispositivos, a distância de comunicação e a quantidade de informação trocada entre os mesmos definem-se como os principais fatores a ter em conta no desenvolvimento de uma rede de comunicação cabalada. Deste modo, é efetuada uma abordagem de redes de comunicação como, por exemplo, 1-Wire, LIN (*Local Interconnect Network*), DMX512, UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), RS485, CAN (*Controller Area Network*), I²C (*Inter-Integrated Circuit*) e SPI (*Serial Peripheral Interface*). Por fim, é efetuada uma abordagem relativa à comparação entre as diferentes tecnologias de acordo com um conjunto de parâmetros.

2.3.1.1 1-Wire

1-Wire define-se como um sistema de comunicação desenvolvido com o intuito de possibilitar a interligação entre sensores e dispositivos de controlo, apresentando como interface uma única linha de transmissão de dados; este sistema revela-se adequado para sistemas em que não seja imperativo uma elevada velocidade de transmissão de dados, sendo adequado para dispositivos que apresentem a necessidade de um baixo consumo energético. O funcionamento deste sistema de comunicação possibilita a operação em dois modos: *standard speed*, com uma taxa de transmissão de 16.3 kb/s e *overdrive speed*, possibilitando uma taxa de transmissão 10 vezes superior. A transmissão de informação é possível de ser efectuada de modo bidireccional (*half-duplex*), utilizando uma única linha de transmissão de dados com um comprimento máximo até 300 m. A arquitetura de funcionamento deste protocolo segue a topologia mestre-escravo, sendo o controlo de fluxo de dados efectuada por um único dispositivo mestre. Além disso, a transferência de informação é apenas possível entre um dispositivo mestre e um escravo, sendo o dispositivo mestre responsável pela inicialização da transferência de dados na linha de transmissão [36].

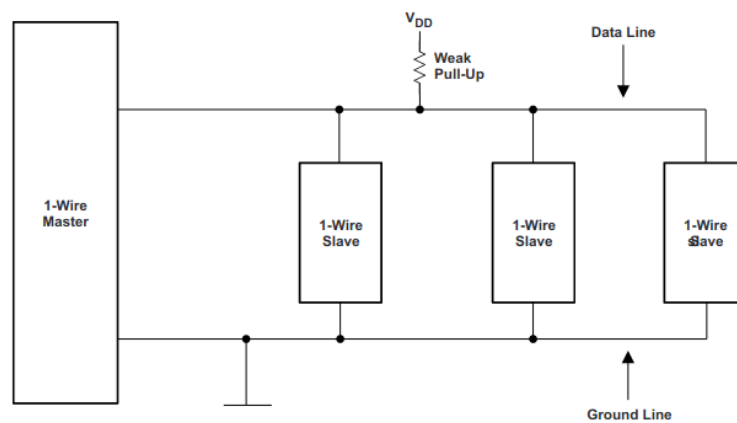


Figura 2.4: Barramento 1-Wire [5]

2.3.1.2 LIN

Local Interconnect Network (LIN) é um protocolo de comunicação série de baixo custo inicialmente desenvolvido por um consórcio de companhias automóvel (Audi, BMW, Daimler-Chrysler, Volcano, Volvo e Volkswagen) em conjunto com a Motorola, tendo sido idealizado com o intuito de ser aplicado em redes de controlo mecatrónico (sensores, atuadores), sendo possível de ser utilizado no âmbito de aplicações industriais. O modo de funcionamento deste protocolo foi uniformizado em 2000 (LIN 1.1) e em 2003 (LIN 2.0), sendo aplicado no ramo automóvel, pela primeira vez, em 2001 [37].

A nível de implementação este protocolo possibilita a transmissão de informação através de uma única linha de transmissão, apresentando uma topologia mestre-escravo. O barramento de transmissão de informação suporta até 1 dispositivo mestre e 16 dispositivos escravos, possibilitando a troca de informação com velocidades até 20 kb/s numa linha de transmissão com comprimento máximo de 40 m. A implementação deste sistema de comunicação, tendo por base *hardware* comum em interfaces do tipo UART/SCI (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter / Serial Communications Interface), possibilita uma implementação de baixo custo, bem como uma maior versatilidade a nível de desenvolvimento de *software* [38]; além disso, permite a auto-sincronização sem a utilização de um oscilador de cristal nos dispositivos escravos, isto é, apenas o dispositivo mestre apresenta o relógio de sincronização [39].

Na figura 2.5 é apresentada uma configuração simplificada do barramento de comunicação LIN.

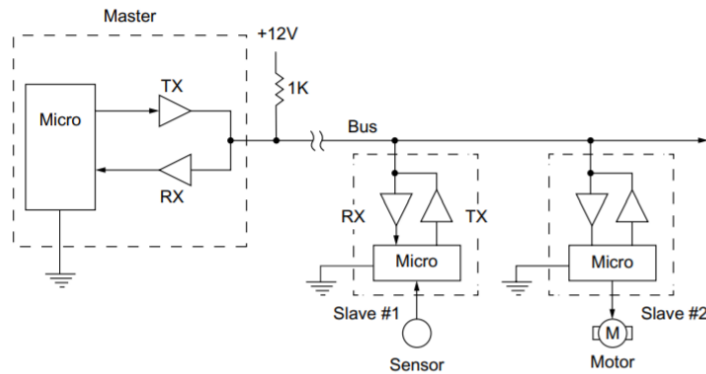


Figura 2.5: Barramento LIN [5]

2.3.1.3 DMX512

O protocolo de comunicação DMX512 foi desenvolvido, em 1986, pela *United States Institute for Theatre Technology* (USITT), sendo que o seu modo de operação tem por base a norma EIA-485, com aplicações no âmbito do controlo de iluminação LED (*Light-Emitting Diode*).

A nível técnico, o DMX512 é definido como um protocolo de comunicação sére, assíncrono, unidireccional (*simplex*) e de 8 *bits*, possibilitando a troca de informação com uma velocidade padrão de 250 kb/s, numa linha de transmissão com comprimento máximo de 500m.

O modo de transmissão de informação é efetuado através de uma trama de dados com o tamanho de 1 *byte*, um *start bit* e dois *stop bits*, apresentando, por isso, o pacote relativo à transmissão de uma mensagem um tamanho de 11 *bits*. O controlo do nível de iluminação é efetuado através de um valor de 8 *bits* (0-255), através do estabelecimento da comunicação com o endereço (1-512) do respetivo dispositivo *slave* [40, 5].

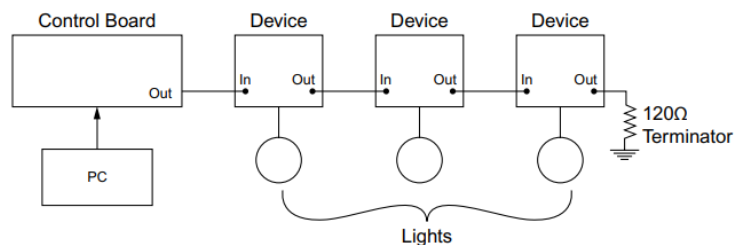


Figura 2.6: Barramento DMX512 [5]

2.3.1.4 UART

UART é um protocolo de comunicação série amplamente utilizado em comunicações de curta distância, baixa taxa de transmissão de dados e baixo custo. Na comunicação série, a informação é transmitida *bit* por *bit* utilizando uma única linha de comunicação (*simplex/half-duplex*) ou duas linhas de comunicação (*full-duplex*), preservando a simplicidade do circuito elétrico, traduzindo-se num baixo custo de implementação. Assim, a utilização do protocolo UART é frequente em sistemas embebidos, microcontroladores e computadores na comunicação entre dispositivos, utilizando para isso duas linhas de comunicação para a transmissão e recepção de informação denominadas Tx e Rx, respetivamente. Tendo em conta que o funcionamento deste protocolo é assíncrono, isto é, não possui um sinal de relógio para a sincronização de informação, é necessário que os dispositivos que transmitem/recebem a informação sejam configurados com a mesma taxa de transmissão (*baud rate*), definindo-se este critério como uma importante premissa para a correta troca de informação entre dispositivos[41].

O princípio de funcionamento deste protocolo envolve a recolha de informação de um barramento de dados de comunicação paralela para o dispositivo UART *Transmitter*, sendo responsável pela conversão e envio da informação em modo de comunicação série. O dispositivo UART *Receiver*, recebe a informação em modo de comunicação série e efetua a conversão e envio da informação em modo de comunicação paralela para o respetivo barramento de dados recetor final. A conversão do método de envio de informação, isto é, comunicação série/paralela, é efetuado através de circuitos lógicos digitais denominados *Shift Registers*. A taxa de transmissão (*baud rate*) é a unidade de transmissão no protocolo de comunicação UART, sendo definida pela unidade bits por segundo (bps), apresentando valores padrão de 1200, 2400, 4800, 9600 e 115200 bps [6].

O modo de transmissão de informação entre dispositivos é efetuada na forma de um pacote de dados, denominado pacote UART, responsável pela criação das tramas de informação série e respetivo controlo da camada física no intercâmbio de dados. Deste modo, o pacote UART é constituído por um *start* bit, a trama de dados (5 a 9 bits), um bit de paridade e, um ou dois *stop* bits, conforme demonstrado na figura 2.7 [42].



Figura 2.7: Pacote UART [6]

2.3.1.5 RS485

O protocolo de comunicação RS-485, aprovado em 1983 pela *Electronics Industries Association* (EIA) como um método de transmissão balanceada padrão (diferencial), com aplicações em áreas relacionadas com a indústria, a medicina, bem como sistemas de segurança e sistemas HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*). O protocolo RS-485 apenas define as características elétricas intrínsecas aos dispositivos (*transceivers*) e meio de comunicação, isto é, normas relacionadas com as características de (*hardware*), sem especificar os protocolos de *software* a utilizar na comunicação entre dispositivos. Contudo, o objetivo primordial deste protocolo é a definição das normas de interface padrão possíveis de serem utilizadas por outras redes de comunicação, como, por exemplo, o protocolo de comunicação DL/T645, utilizado em medidores de energia elétrica na China, que especifica o protocolo RS-485 como a norma padrão a nível da camada física [7].

A norma RS-485 envolve uma interface de transmissão balanceada (diferencial) com o intuito de minimizar a interferência de ruído e consequentes incongruências na troca de dados do sistema de comunicação. A transmissão de dados balanceada consiste num dispositivo transmissor com duas saídas diferenciais (DATA+, DATA-), sendo um sinal a cópia inversa do outro sinal, resultando num cancelamento dos campos eletromagnéticos e, assim, possibilitando a redução da interferência eletromagnética (EMI) do sistema [43].

As características elétricas dos sinais de tensão envolvidos na troca de informação necessitam de respeitar um conjunto de regras *a priori*, tais como: a tensão diferencial gerada pelo dispositivo transmissor, sobre uma carga de 54Ω , deverá apresentar um valor mínimo de 1.5 V, sendo que o dispositivo recetor deverá ser suscetível à deteção mínima de uma tensão diferencial de 200 mV, como demonstrado na figura 2.8. O correto dimensionamento de um sistema RS-485 possibilita assim a transmissão de sinais a longas distâncias de modo de modo fiável, imune a condições de degradação e ruído do sinal de informação ao longo dos cabos e conectores das linhas de transmissão [7, 44].



Figura 2.8: Valores mínimos de tensão num barramento RS-485 [7]

A nível da taxa de transmissão de dados, é possível obter velocidades de 10 Mb/s numa rede com comprimento de 12 m, ou 100 kb/s numa rede com comprimento de 1200 m. Relativamente à topologia de rede, é possível a configuração

de uma rede multiponto com um máximo de 32 pares de transmissores/recetores, sendo a linha de comunicação constituída por 2 fios (*half-duplex*) [7].

Deste modo, apesar do protocolo de *software* não ser definido, é comum a utilização do protocolo de comunicação UART como método de encapsulamento da trama de informação, podendo também serem utilizados outros protocolos utilizando caracteres de controlo ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) [5].

2.3.1.6 CAN

CAN (*Controller Area Network*) é um protocolo de comunicação desenvolvido pela multinacional Robert Bosch GmbH, em 1983, com o intuito de interligar os complexos sistemas de controlo de veículos automóveis.

A nível técnico, o CAN é definido como um protocolo de comunicação série, assíncrono, bidirecional (*half-duplex*) e orientado ao evento. A rede de comunicação é multi-mestre, sendo que todos os dispositivos (*transceivers*) podem ser definidos, em determinado momento, como dispositivos mestres ou escravos; deste modo, cada dispositivo tem livre acesso ao meio de transmissão, podendo efetuar a transmissão de uma mensagem sempre que necessário ou em resposta a um evento [45, 46].

O protocolo CSMA/CD+AMP (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection with Arbitration on Message Priority*) é o mecanismo de acesso ao meio utilizado pelo protocolo CAN, ou seja, cada dispositivo presente na rede, antes de enviar uma mensagem, verifica a disponibilidade de acesso ao barramento de dados; caso este esteja livre, é efetuado o envio da mensagem. De modo a evitar colisões, o algoritmo analisa a prioridade das mensagens a serem transmitidas no barramento de dados. Caso verifique a transmissão de duas mensagens em simultâneo, a mensagem que apresentar menor prioridade interrompe a sua transmissão e a mensagem de maior prioridade é transmitida ininterruptamente. A prioridade de cada mensagem é especificada recorrendo a um identificador de 11 ou 29 *bits* [8].

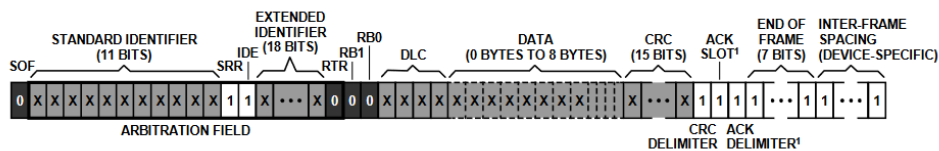


Figura 2.9: Pacote de dados CAN [8]

A transmissão de informação no barramento de dados é efetuada através de um interface de transmissão balanceada (diferencial), sendo as linhas de transmissão denominadas CANH e CANL. Assim, o envio de informação é efetuado recorrendo a dois estados lógicos: dominante e recessivo. No estado lógico recessivo, a saída dos dispositivos de transmissão (*transceivers*) encontra-se num estado de alta impedância e no estado lógico dominante a linha de transmissão CANH encontra-se num nível lógico alto e, a linha de transmissão CANL num nível lógico baixo [47].

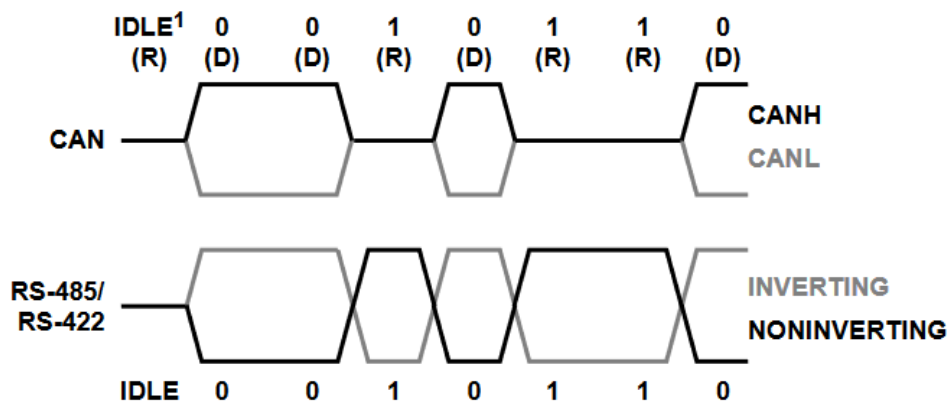


Figura 2.10: Linha transmissão diferencial (CAN vs. RS485/422) [8]

A camada física relativa à implementação do protocolo CAN é especificada pela norma ISO11898, envolvendo um barramento de transmissão sobre par-entrançado com uma impedância de 120Ω . A taxa de transmissão de dados apresenta velocidades de 1 Mb/s numa rede com comprimento de 40 m, ou 40 kb/s numa rede com comprimento de 1000 m. A topologia da rede possibilita uma configuração multiponto com um máximo de 127 dispositivos. A integridade da informação é garantida pelo campo CRC (*Cyclic Redundancy Check*), constituído pelo *checksum* (número de bits transmitidos) da mensagem precedente transmitida entre dois dispositivos [8].

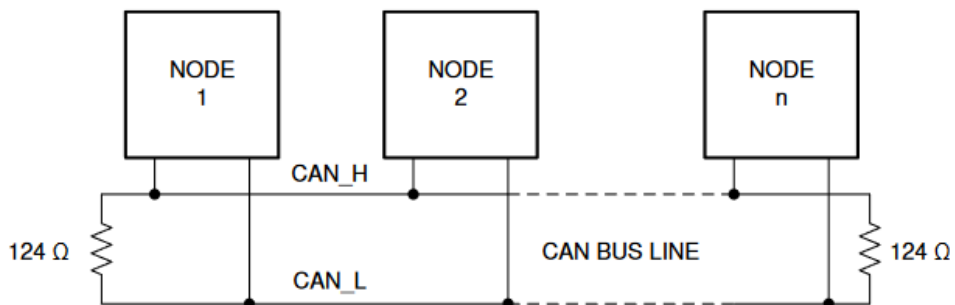


Figura 2.11: Barramento CAN [5]

2.3.1.7 Inter-Integrated Circuit (I²C)

Inter-Integrated Circuit (I²C) é um protocolo de comunicação série síncrono, originalmente desenvolvido pela multinacional holandesa *Phillips Corporation*. O barramento de comunicação possibilita a comunicação de dados bidirecional (*half-duplex*), apresentando a topologia mestre-escravo. O número máximo de dispositivos teórico com possibilidade de ligação a um único barramento é de 1024, contudo, 16 endereços encontram-se reservados para um conjunto de instruções especiais. O dispositivo *master* é responsável por definir a frequência de relógio do barramento, endereçar os dispositivos *slave* e, leitura e escrita de dados nos diferentes dispositivos *slave* [48].

O barramento (I²C) é constituído por duas linhas de comunicação, a linha *Serial Data Line* (SDA) e *Serial Clock Line* (SCL). A estrutura interna simplificada dos dispositivos de comunicação (I²C), *master* ou *slave*, é constituída por um *Field-Effect Transistor* (FET) no envio de informação e um *buffer* na recepção de informação. Deste modo, a transmissão de informação é efetuada colocando o barramento de dados a um nível lógico baixo, através do acionamento do FET ou num nível lógico alto, sem o acionamento do FET, deixando o barramento de dados conectado à resistência *pull-up* [10]. Na figura 2.12 é apresentada a arquitetura geral de um barramento I²C.

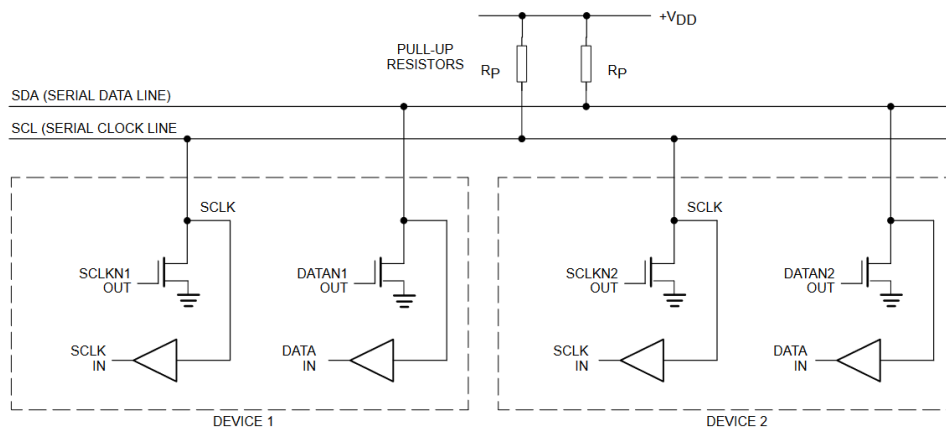


Figura 2.12: Barramento I²C [9]

A nível da taxa de transmissão de dados, é possível obter velocidades de 100 kb/s, 400 kb/s, 3.4 Mb/s ou 5 Mb/s, sendo que o comprimento máximo da linha de transmissão é limitado pelo valor de capacitância máxima de 400 pF.

A transmissão de informação é efetuada recorrendo a tramas de 8 *bits*, através de operações de leitura e escrita. Estas operações são efetuadas através de um conjunto de sub-protocolos relacionadas com *start* e *stop bits*, endereço do *slave*, trama de informação e *bits acknowledge/not acknowledge* (ACK/NACK) [49].

Na fig 2.13 é apresentando um exemplo de operação de escrita no registo de um dispositivo *slave*.

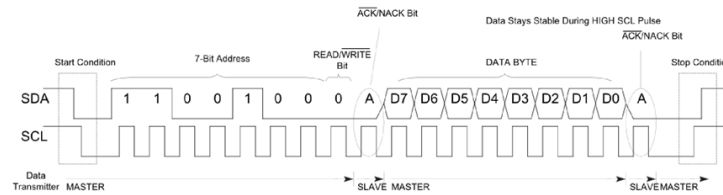


Figura 2.13: Exemplo de uma operação de escrita I²C [10]

2.3.1.8 Serial Peripheral Interface (SPI)

Serial peripheral interface (SPI) é um protocolo de comunicação série síncrono, possibilitando a comunicação de dados bidirecional (full-duplex) através de uma topologia mestre-escravo. O dispositivo *master* é responsável por definir a frequência de relógio do barramento, endereçar os dispositivos *slave*, bem como a leitura e escrita de dados nos dispositivos *slave*.

O barramento SPI (Fig.2.14) é constituído por quatro linhas de comunicação: *Synchronous Clock* (SCLK), *Chip Select* (\overline{CS}), *Master Out Slave In* (MOSI) e *Master In Slave Out* (MISO). O sinal de relógio (SCLK) é responsável pela transmissão de informação sincronizada entre o dispositivo *master* e o dispositivo *slave*. O barramento SPI possibilita a comunicação entre um dispositivo *master* e um ou vários dispositivos *slave*, sendo que a linha CS apresenta como finalidade a seleção do dispositivo *slave* que se pretende efetuar a comunicação. A transmissão de informação é efetuada recorrendo às linhas MOSI e MISO, sendo que a linha MOSI possibilita a transmissão de informação do dispositivo *master* para o dispositivo *slave* e a linha MISO a transmissão de informação do dispositivo *slave* para o dispositivo *master*. Deste modo, dada a existência de duas linhas de comunicação, a transmissão e receção de dados pode ser efetuada simultaneamente (*full-duplex*) [11].

Na figura 2.15 é apresentando um exemplo de transmissão de informação via SPI. O início e fim da transmissão é indicado pela linha tracejada verde, a amostragem de *bits* é indicada laranja e o deslocamento de *bits* indicado a azul. Por fim, neste exemplo, o sinal de relógio apresenta um nível lógico baixo quando não ocorre comunicação entre dispositivos (*idle state*).

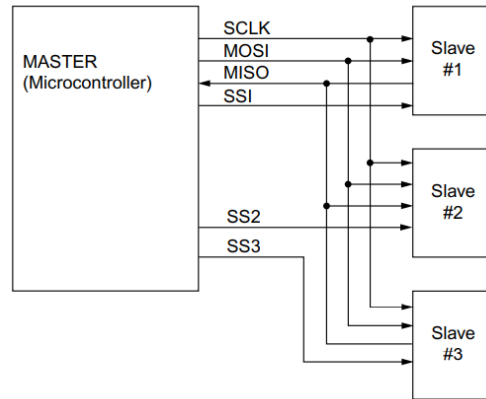


Figura 2.14: Barramento SPI [5]

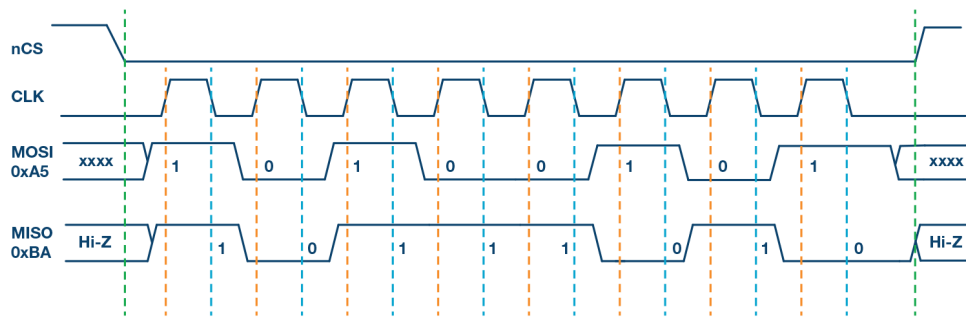


Figura 2.15: Exemplo de transmissão de informação via SPI [11]

2.3.1.9 Análise comparativa das diferentes tecnologias

A abordagem das diferentes tecnologias de comunicação cabladas possibilita a compreensão com maior detalhe do seu funcionamento individual, contudo, é um aspecto de elevada importância a comparação entre as mesmas. Deste modo, na tabela 2.1 é efetuada uma comparação entre as diferentes tecnologias, sendo abordados parâmetros relacionados com o modo de comunicação, número de dispositivos, topologia de rede, taxa de transmissão e alcance.

Tabela 2.1: Comparação das diferentes tecnologias cabladas [5]

Tecnologia	Modo de comunicação	Número dispositivos	Topologia de rede	Taxa de transmissão	Alcance
1-Wire	Assíncrono	2 ⁴⁸	Barramento	16.3 kb/s	300 m
LIN	Assíncrono	16	Barramento, Estrela	20 kb/s	40 m
DMX512	Assíncrono	512	Barramento, <i>Daisy-Chain</i>	250 kb/s	500 m
UART	Assíncrono	2	Barramento	9600 b/s, 115200 b/s	Dependente da, capacitância do barramento
RS485	Assíncrono	256	Barramento, <i>Daisy-Chain</i>	100 kb/s, 10 Mb/s	1200 m, 12 m
CAN	Assíncrono	128	Barramento, Estrela, <i>Daisy-Chain</i>	5 kb/s, 1 Mb/s	1200 m, 40 m
I ² C	Síncrono	128 ou 1024	Barramento, <i>Daisy-Chain</i>	100 kb/s, 5 Mb/s	Dependente da, capacitância do barramento
SPI	Síncrono	Dependente do número de pinos CS	Barramento, <i>Daisy-Chain</i>	20 Mb/s, 100 Mb/s	Dependente da, capacitância do barramento

2.3.2 Redes de comunicação sem fios

A comunicação entre dispositivos sem fios revela-se uma das principais problemáticas, dado que a cobertura da rede, largura de banda e tamanho das mensagens apresentam diversos desafios na troca de informação de forma fidedigna e eficiente. Deste modo, é efetuada uma abordagem de diferentes tipos de redes de comunicação sem fios, tais como, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, Comunicação Móvel, LoRa (*Long Range*) e Sigfox. Por fim, é efetuada uma abordagem relativa à comparação entre as diferentes tecnologias de acordo com um conjunto de parâmetros.

2.3.2.1 Wi-Fi

A tecnologia Wi-Fi é uma rede de comunicação sem fios local com maior utilização a nível mundial, com baixa latência e uma alta taxa de transmissão de dados. A evolução do Wi-Fi apresentou um conjunto de pontos fundamentais para a seu funcionamento relativamente às demais alternativas, entre os quais [50, 51]:

- Facilidade de utilização, dado que o seu desenvolvimento teve como principal objetivo adicionar funcionalidades a redes *LAN (Local Area Network)* cabladas, sem adicionar novas inconveniências ao utilizador.
- Segurança, uma vez que uma rede sem fios apresenta uma segurança bastante inferior relativamente a outras alternativas. O aparecimento de mecanismos de segurança como, por exemplo, o algoritmo WEP (*Wired Equivalent Privacy*) e WPA (*Wi-Fi Protected Access*), possibilitam o estabelecimento de comunicações sem fios mais seguras visto dado que possibilitam a sua encriptação. No entanto a alta vulnerabilidade ainda é um ponto fraco das redes sem fio [52].
- Mobilidade, dispositivos de diferentes marcas devem conseguir comunicar entre si, realizar e terminar uma ligação o mais rápido possível,
- Manutenção da rede é uma tarefa importante, sendo crucial monitorizar o tráfego de um ponto de acesso (AP), o estado do dispositivo e as condições do meio de transmissão. Estes são fatores que tem de se ter em conta de modo a ser possível estabelecer comunicações eficientes e, assim, minimizar a interferência com outras redes.

A especificação que define a tecnologia Wi-Fi é detalhada pela norma IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11a/b/g/n, sendo que a implementação de uma rede Wi-Fi possibilita a definição de redes do tipo estrela, em que os dispositivos comunicam com um estação central; as comunicações são efetuadas na gama espectral das rádio frequências da ordem dos 2.4 GHz e 5 GHz, com um alcance de cerca de 50 m em área aberta. As taxas de transmissão dependem de um variado conjunto de fatores, apresentando valores na ordem dos 150-200 Mb/s, com um valor limite máximo de 600 Mb/s [50, 53]. Os elevados consumos energéticos (Fig. 2.16) dificultam a implementação desta tecnologia em dispositivos IoT, sobretudo se apresentarem uma fonte de energia a baterias.

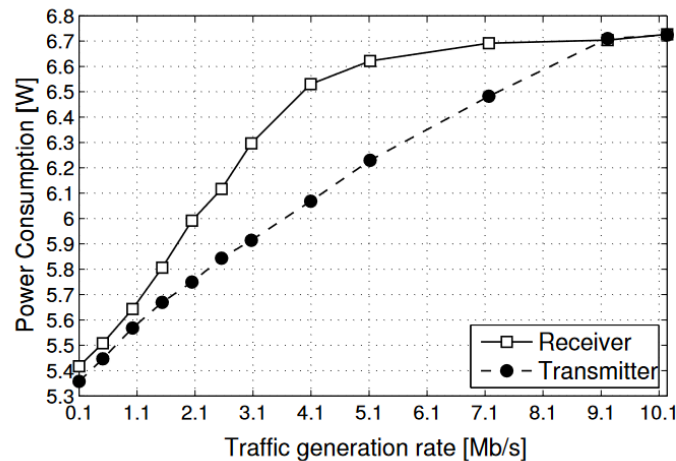


Figura 2.16: Consumo energético médio em relação à velocidade de comunicação [12]

2.3.2.2 ZigBee

A tecnologia ZigBee é uma tecnologia de comunicação amplamente utilizada em dispositivos que envolvam a necessidade de um baixo consumo energético, operando na gama espectral das rádio frequências sem licença, com valores de frequência de 2.4 GHz, 915 MHz e 868 MHz com uma velocidade de transmissão de informação máxima de 250 kb/s. Os dispositivos ZigBee apresentam funcionalidades relacionadas com um baixo consumo energético, apresentando a possibilidade de operarem no modo *deep sleep*, condição ideal para dispositivos que funcionem a baterias e, conseqüentemente, operarem por maiores períodos de tempo sem a necessidade de recarregar as mesmas. O funcionamento desta tecnologia é definida pela norma IEEE 802.15.4, preservando velocidades de transmissão elevadas aliadas a uma elevada eficiência energética; além disso, o protocolo ZigBee permite a definição de redes de comunicação do tipo estrela, árvore ou *mesh*. Deste modo, apresenta encriptação a nível da camada de rede e aplicação e, alcances que podem variar desde 10 m a 100 m [54, 23, 55].

2.3.2.3 Z-Wave

Z-Wave é uma tecnologia de comunicação sem fios que apresenta uma elevada eficiência energética, com a possibilidade de gerir uma rede de comunicação com um número de dispositivos que pode variar entre valores de 30 a 50, condição que satisfaz a sua utilização na área da IoT. Assim, possibilita a operação na gama espectral das rádio frequências sem licença, com uma frequência de 900 MHz e velocidades de transmissão que podem variar entre 9.6 kb/s e 40 kb/s. Além disso, existe ainda a possibilidade de operar na frequência de 2.4 GHz, apresentando

velocidades máximas de 200 kb/s. O funcionamento de uma rede Z-Wave envolve dois tipos de dispositivos: o dispositivo central, denominado controlador, e os dispositivos periféricos, denominados *slaves*. O dispositivo controlador efetua a gestão de toda a rede através de uma tabela de *routing*, definindo a topologia da rede de modo a serem selecionadas as melhores rotas de transmissão de mensagens para o dispositivo de destino, sendo que os dispositivos *slave* operam como dispositivos mediadores de modo à mensagem chegar ao dispositivo destino. Deste modo, é uma tecnologia que permite a definição de redes *mesh*, com alcances até 100 m em áreas abertas [56, 23].

2.3.2.4 Comunicação móvel

A rede de telemóvel é uma alternativa a considerar em dispositivos que necessitem de uma velocidade de transferência de dados elevada e a necessidade de efetuar a comunicação a longas distâncias. Existem varias versões desta rede que são apresentadas em seguida [23]:

- Protocolo: GSM/GPRS/EDGE (2G), UMTS/HSPA (3G), LTE (4G)
- Bandas de funcionamento: 900/1800/1900/2100 MHz
- Alcance de 35 km para o GSM, 100 km LTE e 200 km para o HSPA
- Taxas de transmissão: 35-170 kbps (GPRS), 120-384 kbps (EDGE), 384 kbps a 2 Mbps (UMTS), 600 kbps a 10 Mbps (HSPA), 3 a 10 Mbps (LTE).

Uma das principais desvantagens da rede de telemóvel está relacionada com o alto consumo de energia, especialmente quando as taxas de transmissão são altas e a rede utilizada é o 4G. Certas características desta tecnologia, tal como os consumos energéticos elevados, podem revelar-se um fator de exclusão, sobretudo em equipamentos que apresentem uma fonte de energia a baterias.

2.3.2.5 LoRa

LoRa, do inglês *Long Range*, é uma tecnologia de comunicação sem fios que possibilita a transmissão de informação a longas distâncias. A utilização da técnica (CSS) *chirp spread spectrum*, possibilita um elevado nível de eficiência energética, bem como a comunicação a longas distâncias. Deste modo, a transmissão de informação é efetuada utilizando a gama espectral das rádio frequências sem licença - ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), isto é, 868 MHz na Europa e 915 MHz na América do Norte. A técnica CSS possibilita a comunicação bidirecional através da modulação do sinal numa banda de faixa estreita num canal com uma largura de banda ampla, possibilitando a obtenção de um sinal com baixos níveis de ruído e uma baixa suscetibilidade a interferências. Além disso,

utiliza *spreading factors* que permitem a gestão do equilíbrio entre a velocidade de transmissão e o alcance da comunicação, ou seja, um *spreading factor* com maior valor possibilita um alcance maior e uma velocidade de transmissão menor, e vice-versa. A receção de sinais com diferentes *spreading factors* pode ser efetuado simultaneamente por uma única estação, sendo que as velocidades de transmissão podem variar desde os 300 b/s até 50 kb/s [57, 23].

LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) é o protocolo de comunicação que possibilita o controlo e gestão das tramas de informação, definindo a arquitetura da rede de comunicação e, deste modo, efetuando a gestão de questões relacionadas com a eficiência energética de um nó na rede, a capacidade da rede, a qualidade do serviço e a segurança. Esta tecnologia utiliza frequentemente uma arquitetura de rede do tipo *mesh*, permitindo que diferentes dispositivos comuniquem entre si e efetuem a partilha de informação com o intuito de aumentar o alcance da rede. A trama de informação apresenta *payload* máximo de 243 *bytes*, apresentando um alcance de 20 km em áreas rurais e 5 km em áreas urbanas [57, 24].

2.3.2.6 Sigfox

Sigfox é uma rede concebida em 2010 e desenhada com o intuito de satisfazer as necessidades de dispositivos relacionados com a área da IoT, sendo, atualmente, responsável pela cobertura de mais de 1/6 da população mundial num total de 70 países [13].

A rede Sigfox é uma tecnologia que pertence ao domínio das redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), com uma taxa de transmissão baixa, na ordem dos 10 a 1000 b/s [23], sendo por isso designada por rede 0G, em comparação ao surgimento das redes 5G que apresentam taxas de transmissão altas e com elevada largura de banda. Um dos pontos fundamentais deste tipo de tecnologia envolve a necessidade de satisfazer requisitos relacionados com um baixo consumo energético e, assim, contribuir significativamente para a autonomia dos dispositivos. Além disso, apresenta a capacidade de transmissão de informação a longas distâncias, com valores de 10 a 40 km em zonas rurais e 1 a 5 km em zonas urbanas, traduzindo-se numa extensa cobertura de rede [24].

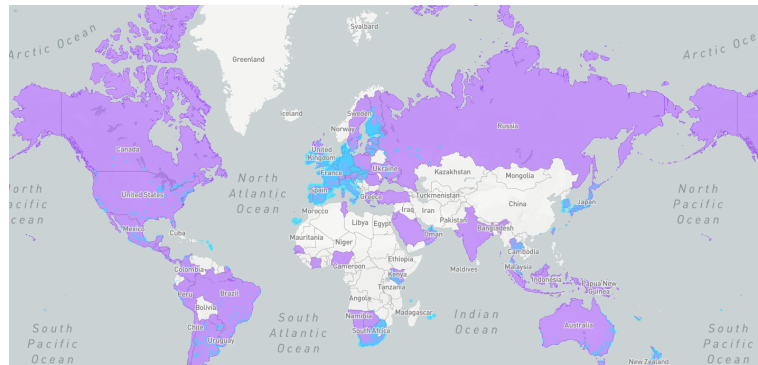


Figura 2.17: Cobertura da rede Sigfox. Azul áreas com serviço disponível e violeta áreas em implementação [13]

O protocolo Sigfox utiliza faixas de rádio frequência ISM, com uma largura de banda na ordem dos 200 kHz, operando a uma frequência de 868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia. A implementação esta tecnologia apresenta um baixo custo, dado que a transmissão de informação a longas distâncias possibilita a redução de um grande número de dispositivos a nível de infraestrutura da rede, o que para o utilizador se traduz na possibilidade de subscrição de cada módulo de comunicação a um preço competitivo relativamente às restantes tecnologias disponíveis no mercado [24].

2.3.2.7 Análise comparativa das diferentes tecnologias

A abordagem individual das diferentes tecnologias de comunicação sem fios possibilita uma maior compreensão do seu funcionamento, contudo, é essencial efetuar uma comparação entre as mesmas. Deste modo, na tabela 3.1 é efetuada a comparação entre as diferentes tecnologias, sendo abordados parâmetros relacionados com o tipo de norma, consumo energético, banda de frequência, taxa de transmissão e alcance.

Tabela 2.2: Comparação das diferentes tecnologias sem fios [23, 24]

Tecnologia	Norma	Consumo Energético	Banda de Frequência	Taxa de transmissão	Alcance
LoRa	LoRaWAN	Muito Baixo	868/900 MHz	0.3–50 Kb/s	<30 Km
Wi-Fi	IEEE 802.11 a/c/b/d/g/n	Alto	5–60 GHz	1 Mb/s–6.75 Gb/s	20–100 m
Comunicação Móvel	2G-GSM, 3G-UMTS, 4G-LTE-A, 5G	Médio	865 MHz–2 GHz	200 kb/s–1 Gb/s	Área de cobertura rede celular
ZigBee	IEEE 802.15.4	Baixo	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	250 kb/s	10-100 m
Z-Wave	Z-Wave Alliance	Baixo	900MHz, 2.4 GHz	9.6-40 kb/s 200 kb/s	100 m
Sigfox	Sigfox	Muito Baixo	868 MHz, 902 MHz	100-600 bps	30-50 Km, 3-10 Km

2.4 Sensores

2.4.1 Piezoelétricos, Piezoresistivos e Capacitivos

Os sensores piezoresistivos apresentam como princípio de funcionamento a deformação, através de uma força externa, da sua estrutura física, resultando na alteração da distribuição e pontos de contacto das zonas de condução internas e, assim, originando uma variação da resistência elétrica do sensor. Dado que estes sensores não apresentam uma estrutura muito complexa, associado ao baixo consumo energético, suscetibilidade de suportar uma ampla variação de forças de pressão e simplicidade no processo de produção, evidencia-se um estudo mais aprofundado deste tipo de sensores comparativamente a sensores de pressão piezoelétrico e capacitivos.

Os sensores de pressão capacitivos têm por base o princípio de funcionamento de um condensador, onde dois materiais condutores (armaduras ou placas) são separados por um material isolante (dielétrico), sendo capaz de armazenar cargas elétricas. Este tipo de sensores apresenta como principais vantagens uma alta sensibilidade, tempo de resposta rápido e a suscetibilidade de suportar uma ampla variação de forças de pressão. O seu funcionamento consiste na alteração da capacitância do sensor através da modificação da distância entre as placas ou armaduras aquando exercida uma força externa. A capacitância pode ser calculada recorrendo à equação 2.1, onde ϵ é a constante dielétrica, e A e d a área

e distância das placas ou armaduras, respetivamente. A capacitância é inversamente proporcional à distância entre placas e proporcional à constante dielétrica e respetiva área das placas.

$$C = \epsilon A/d \quad (2.1)$$

Os sensores de pressão piezoelétricos são compostos por materiais piezoelétricos, convertendo a energia mecânica em energia elétrica. O seu funcionamento envolve o princípio do efeito piezoelétrico, sendo gerada uma diferença de potencial devido a uma redistribuição de cargas elétricas do material cristalino aquando exercida uma força externa [58].

2.4.2 Fotoelétricos

Os sensores fotoelétricos são constituídos por um sistema responsável pela emissão do sinal eletromagnético e respetiva deteção do mesmo. O sinal fotoelétrico transmitido pelo circuito emissor é sujeito a uma perturbação, seja ela relacionada com uma reflexão, transmissão ou absorção pelo objeto a ser detetado.

O funcionamento deste tipo de sensores pode ser resumido, essencialmente, em três modos: *thru-beam*, *retroreflective* ou *reflective*, como pode ser observado na figura 2.18. O funcionamento do sistema *thru-beam* envolve a interrupção do sinal emitido relativamente ao sistema de deteção. O sistema *retroreflective* e *reflective* envolvem, do mesmo modo, a interrupção do sinal, contudo, a sua deteção envolve a sensorização do sinal de refletido resultante da modificação efetuada pelo objeto a detetar sobre o sinal de emissão original.

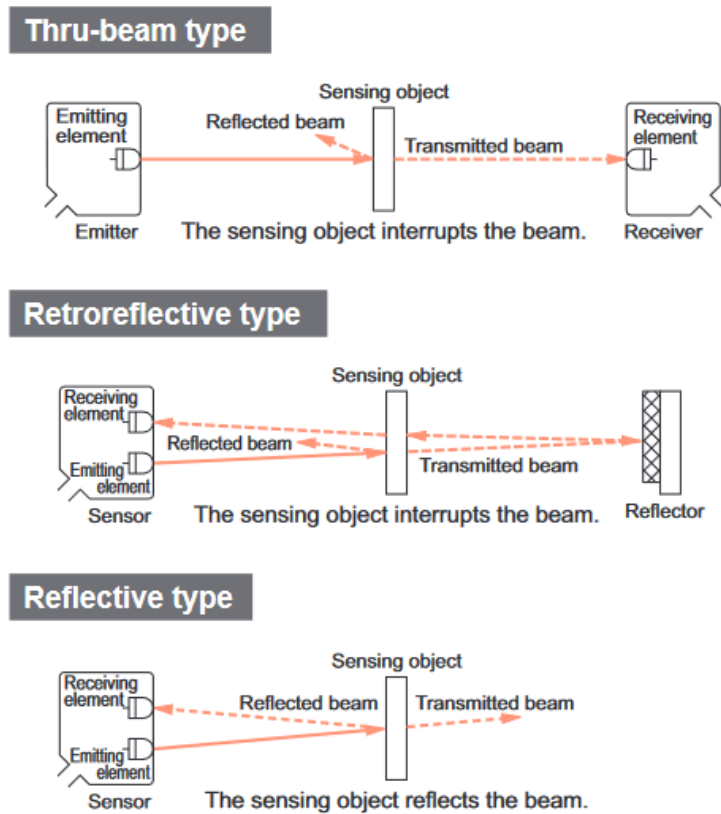


Figura 2.18: Tipos de sistemas de sensorização fotoelétrica [14]

O método de emissão do sinal fotoelétrico é um aspeto importante a ter em conta no sistema a dimensionar. A influência da luz ambiente e ruído ótico presente no meio de sensorização poderá originar a deteção de falsos sinais fotoelétricos. Deste modo, existem dois tipos de emissão do sinal infravermelho: modulado e não modulado.

A modulação do sinal do sinal por pulsos a uma determinada frequência possibilita a distinção do mesmo pelo sistema de receção relativamente ao ruído ambiente. A emissão do sinal não modulado é efetuada a uma intensidade constante, podendo ser suscetível a interferência do ruído ambiente. Assim, a redução da interferência do ruído ótico ambiente relativamente ao sinal modulado possibilita uma distância de sensorização superior [14].

2.4.3 Ultrassônicos

A transmissão e recepção de ondas ultrassônicas é um método frequentemente utilizado em sistemas relacionados com a medição de distâncias, detetores de objetos ou medição de velocidades.

O princípio de funcionamento de um transdutor ultrassônico consiste na transmissão de uma onda ultrassônica e recepção da mesma através da reflexão resultante da colisão com um objeto. A recepção da onda ultrassônica pode ser efetuada pelo mesmo transdutor (*pulse-echo*) ou por outro transdutor (*pitch-catch*). No modo *pulse-echo*, a distância entre o transdutor ultrassônico e o objeto é calculada através da medição do tempo entre a transmissão do sinal e a respetiva recepção, através da Equação 2.2, onde c representa a velocidade de transmissão do som no meio [15].

$$s = ct/2 \quad (2.2)$$

No modo de transmissão *pitch-catch*, a distância é calculada através da Equação 2.3.

$$d = \sqrt{(s^2 - (h/2)^2)} \quad (2.3)$$

Os sistemas de medição de distâncias ultrassônicos apresentam uma arquitetura típica conforme apresentado na figura 2.19, sendo compostos por um conjunto de transdutores, circuitos de transmissão e recepção, um microprocessador e um módulo de temperatura para a compensação de eventuais erros relacionados com a velocidade de transmissão no som no ar a diferentes temperaturas.

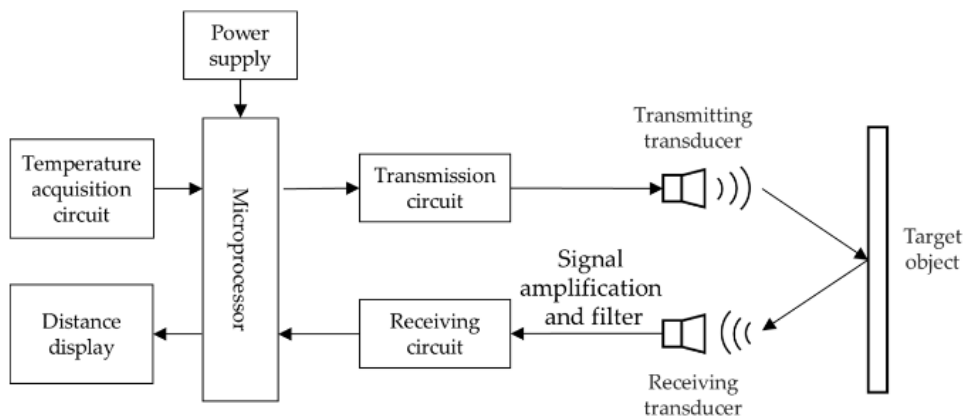


Figura 2.19: Diagrama de um sistema de medição de distâncias ultrassônico [15]

O processamento dos sinais de recepção pelo microprocessador é efetuado através da obtenção do tempo (T_1) relacionado com o início da transmissão do sinal, pelo transdutor emissor, que colidirá com o objeto, resultando numa reflexão e respetiva aquisição pelo transdutor recetor. A obtenção de T_1 é efetuada recorrendo a diferentes métodos, tais como, o método ToF (*Time of Flight*), TFCW (*Two Frequency Continuous Wave*), MFCW (*Multi-Frequency Continuous Wave*), BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*), modulação em amplitude ou codificação de sinal [15]. Na figura 2.20 é apresentada a comparação entre um sinal de recepção ideal e com ruído.

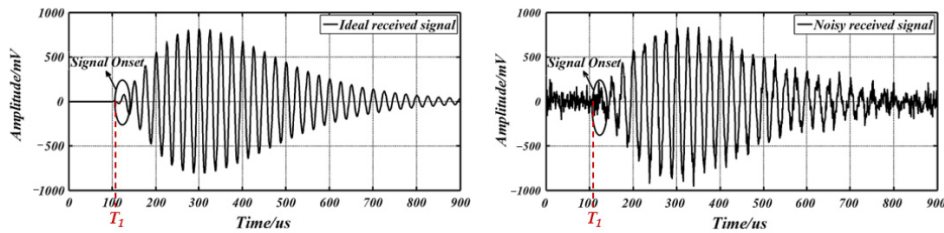


Figura 2.20: Sinal de recepção ultrassónico ideal e com ruído [15]

2.5 Sistema de Gestão Energético

O sistema de gestão energético apresenta a possibilidade de ser desenvolvido recorrendo a tecnologias de recolha de energia tendo por base a utilização de fontes de energia renovável. Assim, é efetuada uma abordagem da energia solar, energia proveniente do sol e de fácil exploração, efetuando-se uma análise das tecnologias inerentes à sua utilização, isto é, a abordagem da constituição e funcionamento da célula fotovoltaica. Além disso, um aspeto importante a ter em conta é que esta energia apenas se encontra disponível durante um determinado período do dia, sendo importante o dimensionamento de um sistema de armazenamento energético. Assim, é efetuada uma abordagem das diferentes tecnologias relativas ao armazenamento de energia em baterias, bem como a análise de parâmetros relativos à tensão, capacidade, ciclos de carga/descarga e densidade energética de diferentes tipos de baterias.

2.5.1 Energia Solar

A energia proveniente do sol é uma fonte de energia renovável, abundante, de fácil exploração e não poluente, aspeto de elevado relevo tendo em conta o panorama contemporâneo de consciencialização sobre as alterações climáticas e consequente impacto nos ecossistemas, incentivando a utilização destas fontes de energia limpa. A energia solar é transformada em energia elétrica através da utilização de células fotovoltaicas, tendo por base o fenómeno denominado de efeito fotovoltaico. A potência elétrica produzida por uma célula fotovoltaica é intrinsecamente dependente da intensidade da luz solar, tamanho da célula e respetivo rendimento. Ao conjunto de células fotovoltaicas combinadas é atribuído o termo módulo ou painel solar [25].

O silício (Si) é o principal componente das células fotovoltaicas, podendo ser classificadas de acordo com a sua composição, nomeadamente células constituídas por silício monocristalino (com eficiência de 15-24%), silício policristalino (com eficiência de 14-20.4%) e silício amorfo (com eficiência de 8-13%). A capacidade de produção de um sistema fotovoltaico encontra-se diretamente relacionada com a área de instalação, sendo que em projetos para sistemas embebidos, o dimensionamento do sistema de recolha de energia solar apresente uma densidade de potência com um valor de 15 mW/cm^2 [59].

Na figura 2.21 é possível observar graficamente as características elétricas de uma célula fotovoltaica, denotando-se que a sua capacidade de produção está diretamente relacionada com a intensidade da luz solar e temperatura ambiente. Os controladores MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) possibilitam o controlo da operação da célula em torno da potência máxima do painel P_{max} , tendo em conta diversos cenários possíveis de irradiância, temperatura ambiente e carga elétrica.

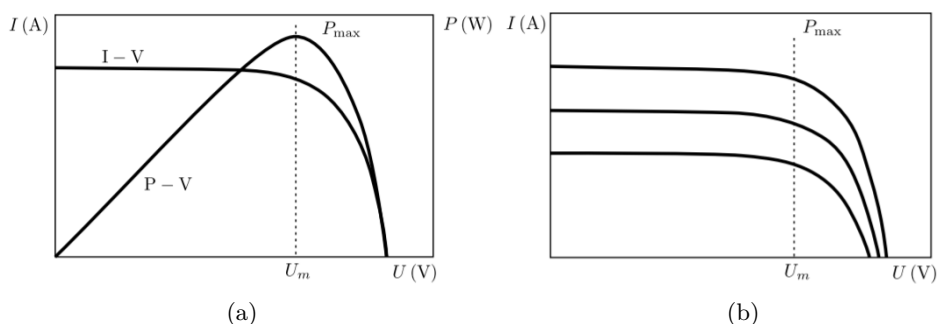


Figura 2.21: Curvas características da célula fotovoltaica: Corrente-Tensão (I-V) e Potência Tensão (P-V). (a) Irradiância Constante (b) Irradiância Variável [25]

2.5.2 Armazenamento Energético

O armazenamento energético envolve um conjunto de tecnologias necessárias para a conversão da energia elétrica para um tipo de energia suscetível de ser armazenada, como, por exemplo, a energia química. Os requisitos da aplicação condicionam a escolha da tecnologia de armazenamento, podendo ser definida de acordo com propriedades relacionadas com a capacidade, a potência, os números de ciclos de carga e descarga. Deste modo, o dimensionamento correto da tecnologia é crucial, de modo a satisfazer requisitos relacionados com o tamanho, capacidade adequada e um baixo impacto ambiental.

O dimensionamento de um sistema tendo por base a utilização de baterias envolve a análise de diversos fatores relacionados com os requisitos do sistema, tais como: tamanho, peso e ciclos de carga/descarga da bateria, encontrando-se o último diretamente relacionado com o tempo de vida útil do sistema. Além disso, existem diversas especificações de relevo como, por exemplo, a densidade energética (Wh/Kg), indicando a quantidade de energia possível de ser armazenada por unidade de massa, a resistência interna e a tolerância a sobrecarga. A capacidade da bateria representa a quantidade de energia possível de ser armazenada numa célula carregada. O número de ciclos de carga e descarga variam de acordo com o tipo de bateria, sendo que ao longo dos mesmos a capacidade da bateria diminui devido à degradação dos eletrodos por corrosão [25]. Na tabela 2.3 apresentam-se os parâmetros de diferentes tipos de baterias.

Tabela 2.3: Parâmetros de diferentes tipos de bateria [25]

Tipo	Tensão (V)	Capacidade (Ah)	Ciclos carga/descarga	Densidade energética (Wh/kg)
Lead-Acid	2	1.3	500–1000	30–50
MnO ₂ Li	3	0.03–5	1000–2000	280
Li poly-carbon	3	0.025–5	-	100–250
LiSOCl ₂	3.6	0.025–40	-	350
LiO ₂ S	3	0.025–40	-	500–700
NiCd	1.2	1.1	10.000–20.000	50–60
NiMH	1.2	2.5	1000–20,000	60–70
Li-Ion	3.6	0.74	1000–100,000	75–200
MnO ₂	1.65	0.617	-	300–610

2.6 Análise de soluções acadêmicas

Nesta seccção são apresentadas soluções acadêmicas relativas ao sistema de passadeiras inteligentes. A sua análise revela-se interessante dado que, no âmbito geral, apresentam a utilização de um conjunto de métodos diferentes aos abordados em soluções comerciais. Deste modo, é possível a avaliação da solução desenvolvida, entender os princípios de funcionamento e a reflexão sobre possíveis tecnologias a implementar da solução a desenvolver.

2.6.1 *Smart Crosswalk Dynamic Lighting System (SCDLS)*

A solução académica apresentada consiste num sistema desenvolvido com o intuito de diminuir a sinistralidade rodoviária entre peões e veículos motorizados em passadeiras. Deste modo, recorrendo a um conjunto de módulos presentes em passadeiras, é possível iluminar o interior e exterior de uma passadeira aquando da entrada de um peão e, assim, alertar os condutores relativamente à presença de um peão; Além disso, existe a possibilidade de efetuar a recolha de dados de tráfego rodoviário para uma posterior análise.

Os módulos do sistema SCDLS são constituídos por um microcontrolador, sensores, uma bateria, um painel fotovoltaico, módulos de comunicação sem fios e LEDs (*Light-Emitting Diode*). A deteção de peões é efetuada recorrendo a um sensor infravermelho passivo, sendo que a deteção de veículos é efetuada recorrendo a uma bússola digital, ou magnetómetro de 2 eixos, instrumento utilizado na medição do campo magnético. Os módulos de comunicação sem fios possibilitam a utilização do protocolo Wi-Fi com o intuito de enviar a informação relativa aos dados de tráfego rodoviário para um servidor remoto, bem como um modo de comunicação de baixo consumo energético, permitindo que os módulos comuniquem entre si. O sistema de iluminação consiste num conjunto de LEDs RGB (*Red Green Blue*), desenvolvido com a finalidade de apresentar um diverso conjunto de padrões de iluminação, alertando os condutores de modo mais eficiente.

O sistema de gestão energética é constituído por um painel fotovoltaico de 1.5 W e uma bateria de iões de lítio de 3500 mAh, o que permite a autossuficiência energética de cada módulo por um período mínimo de 5 anos [60].

2.6.2 *Vehicle Detection System for Smart Crosswalks using Sensors and Machine Learning*

Este artigo [61] descreve o desenvolvimento de um sistema de detecção de veículos e peões, sendo constituído por um sensor ultrassónico na detecção de peões e um magnetómetro na detecção de veículos próximos da uma passadeira e um sensor RADAR na detecção de veículos em aproximação de uma passadeira.

O sistema deriva de uma solução anterior na qual, a fusão e tratamento de informação era efetuado através de um controlador de lógica Fuzzy; a desvantagem associada a este método reside no reajuste das variáveis de controlo de acordo com a localização do sensor na estrada, principalmente o magnetómetro, com uma maior sensibilidade relativamente ao campo magnético gerado por cabos de alimentação, condutas e outros materiais ferromagnéticos.

A detecção de veículos em aproximação a uma passadeira é efetuado através da análise e processamento de informação proveniente dos sensores através um diversificado conjunto de técnicas de *machine learning*, tais como: *random forest* (RF), *extremely randomized trees* (*extra-tree*), *deep reinforcement learning* (DRL), *time series forecasting* (TSF), *multi-layer perceptron* (MLP), *k-nearest neighbor* (KNN) e *logistic regression* (LR).

A análise e validação dos resultados obtidos foi efetuada através dos métodos estatísticos *receiver operating characteristic* (ROC) e *area under the curve* (AUC). A técnica RF apresenta o melhor desempenho, com um *true positive rate* (TPR) de 96.82%, *false positive rate* (FPR) de 1.73%, uma exatidão (ACC) de 97.85% e AUC de 0.98, seguida pelas técnicas DRL e TSF, sendo que as técnicas MLP e LR apresentaram os resultados menos satisfatórios [61].

2.6.3 Presence Sensor for People Detection and Reduction of Pedestrian Waiting Time in Traffic Light

O aumento da afluência de veículos em ambientes citadinos apresenta-se como uma das principais razões inerentes ao aumento do tempo de espera, por parte dos veículos e peões, em pontos de controlo de tráfego rodoviário com sinalização luminosa. Assim, o artigo [16] apresentado visa o desenvolvimento de uma alternativa na deteção de pedestres que substitua o convencional botão de pressão, através de um conjunto de sensores de presença piezoelétrico e infravermelho (Fig. 2.22).

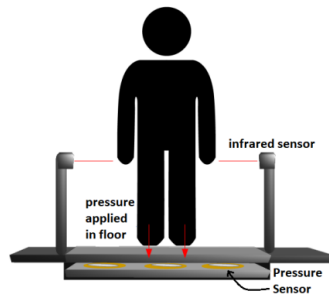


Figura 2.22: Sistema de deteção de peões [16]

A implementação de um modelo de uma hipotética interseção rodoviária foi efetuada através de uma simulação por *software*, sendo definidos dois cenários de impedimento do tráfego rodoviário: o primeiro cenário apresenta um tempo de espera fixo, sendo que o segundo cenário apresenta um tempo de espera variável de acordo com a densidade do tráfego rodoviário. Os resultados obtidos apresentam, para o primeiro cenário, um tempo de espera médio para os veículos de 45.08s, sendo que no segundo cenário o tempo de espera médio é reduzido para 31.65s, resultando numa diminuição do tempo médio de espera em 13.43s. Os resultados de tempo de espera obtidos demonstram a melhoria do desempenho no controlo do tráfego rodoviário aquando da utilização de diferentes cenários de espera, condicionados pela densidade rodoviária em tempo real, resultando numa maior fluidez de todo o trânsito rodoviário [16].

2.6.4 *Pedestrian Traffic Light Control with Crosswalk FMCW Radar and Group Tracking Algorithm*

Este artigo [26] descreve o desenvolvimento de um sistema de controlo de tráfego rodoviário inteligente com sinalização luminosa, efetuando a deteção de peões através da tecnologia radar *Frequency-modulated continuous-wave* (FMCW).

O sistema de deteção de peões utiliza o módulo IWR6843AOPEVM, desenvolvido pela *Texas Instruments*. O sensor IWR6843AOP incluído no módulo opera no espectro eletromagnético com frequências que variam entre os 60-64 GHz, denominado *millimeter-wave spectrum* (mmWave). Este sensor utiliza a técnica FMCW como método de transmissão do sinal de rádio, denominado *chirp*. O *chirp* consiste num sinal de onda contínua modificado linearmente em frequência ao longo do período de transmissão, sendo que o sensor desenvolvido pela *Texas Instruments* apresenta a tecnologia *up-chirp*, isto é, a frequência do sinal aumenta linearmente ao longo do tempo. Deste modo, o radar foi configurado para a deteção de peões com um alcance de 10.95m e resolução de 21.4cm.

A deteção e seguimento dos pedestres envolve a utilização do algoritmo *Group Tracker* (GTRACK), desenvolvido pela *Texas Instruments* com o intuito de ser utilizado na linha de sensor mmWave. Este algoritmo utiliza a informação recolhida pelo radar, sendo definida como uma nuvem de pontos. Através da recolha deste dados, o algoritmo procede ao tratamento e processamento da informação em *clusters* (Filtragem no domínio espacial) e respetivo seguimento (Filtragem no domínio temporal).

Os testes efetuados envolveram a definição de seis diferentes cenários, sendo que cada cenário repetido 50 vezes. O primeiro cenário consiste na entrada e espera de peões pelo sinal verde para atravessar a passadeira, na área de observação do radar. No segundo cenário, os peões apenas se movimentam ao longo da área de observação, de modo a verificar se o sistema deteta corretamente a intenção de um pedestre atravessar a passadeira. Em ambos os cenários, apenas um único peão se encontrava na área de observação ao longo dos vários testes. O terceiro cenário envolve a deteção e seguimento de vários peões, dado que em ambiente real existe a possibilidade de coexistirem múltiplos pedestres. Deste modo, dois ou mais participantes encontram-se na área de observação simultaneamente. No quarto cenário, apenas dois ou três participantes se movimentam ao longo da área de observação, de modo a verificar se o sistema efetua a deteção correta da intenção de um peão atravessar a passadeira. Este cenário, tal como o segundo cenário, pretende avaliar a possibilidade de falsos positivos, dado que deverá ser suscetível a peões em espera na área de observação e imune a peões que se deslocam ao longo da via pública, sem a intenção de atravessar a passadeira. O quinto e sexto cenário são similares aos primeiro e segundo cenário, respetivamente, sendo que diferem no facto de, o único peão na área de observação, se

encontrar com o uso de um guarda-chuva. O objetivo destes dois últimos cenários é verificar se o sistema se revela capaz de efetuar a correta detecção dos peões e, conseqüente intenção de atravessarem a passarela [26].

Tabela 2.4: Resultados obtidos nos diferentes cenários [26]

Cenário	Correto	Atraso	Incorreto
Cenário 1	47/50 (94%)	3/50 (6%)	0/50 (0%)
Cenário 2	46/50 (92%)	N/A	4/50 (8%)
Cenário 3	45/50 (90%)	2/50 (4%)	3/50 (6%)
Cenário 4	44/50 (88%)	N/A	6/50 (12%)
Cenário 5	45/50 (90%)	5/50 (10%)	0/50 (0%)
Cenário 6	50/50 (100%)	N/A	0/50 (0%)

Na tabela 2.4 é possível observar os resultados experimentais obtidos ao longo dos diversos cenários de teste. Por fim, é ainda referido que a detecção de peões que se movimentam em direções tangenciais e com baixas velocidades radiais se revela menos satisfatória, traduzindo-se num maior período de tempo maior na detecção de um pedestre. Contudo, comparativamente a soluções baseadas em câmaras de vídeo padrão ou infravermelhos, esta alternativa apresenta uma maior imunidade a diferentes condições de luminosidade ambiente, possibilitando um desempenho constante do sistema.

2.6.5 *Autonomous Pedestrian Crossing in Smart City Environment*

Esta solução consiste na utilização de sensores infravermelho na detecção de peões, apresentando ainda a possibilidade de recolha de dados relativos ao tráfego pedonal. A iluminação da passadeira é efetuada recorrendo a um *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), projetando sobre a interseção rodoviária um plano de iluminação homogéneo; além disso, um sinal luminoso amarelo de aviso é direcionado para os condutores, informando da presença de um peão.

Após a seleção das tecnologias a implementar, foram conduzidos testes de consumo energético: a unidade de processamento apresenta uma potência de 0.23 W, encontrando-se ativa durante 15 horas por dia, perfazendo um consumo energético total de 3.45 Wh/dia. O sensor infravermelho apresenta uma potência de 0.12 W, encontrando-se ativo durante 15 horas, resultando num consumo energético de 1.8 Wh/dia. O sistema apresenta a possibilidade de desconectar a alimentação do circuito de iluminação, resultando numa maior eficiência energética, sendo que o módulo de controlo associado encontra-se ativo durante 9 horas, traduzindo-se num consumo energético de 0.648 Wh/dia. O circuito de gestão energética encontra-se ativo ininterruptamente, apresentando uma potência de 0.06 W e respetivo consumo energético de 1.44 Wh/dia. Deste modo, o consumo energético diário apresenta um valor de 7.338 Wh.

O consumo do sistema de iluminação dinâmica envolve a necessidade de obter dados relativos à utilização específica da passadeira. Deste modo, é referido no artigo [62] que o desvio relativo ao número de atravessamentos na passadeira apresenta um valor de 381. Assim, os dispositivos *laser* apresenta uma potência combinada de 1.848 W, encontrando-se ativos durante 15 s, resultando num consumo energético diário de 2.94 Wh. O sinal luminoso amarelo de aviso apresenta uma potência de 0.00833 Wh por cada atravessamento, sendo que funciona com uma potência de trabalho de 10% relativamente à nominal, resultando num consumo energético diário de 0.32 Wh. Deste modo, o consumo energético de todo o sistema apresenta um valor de 10.6 Wh por dia. A alimentação de todo o circuito é efetuada recorrendo a duas baterias de gel com uma capacidade de 168 Wh [62].

2.7 Análise de soluções comerciais

Nesta secção são apresentadas as soluções comerciais relativas a sistema de passadeiras inteligentes. Estas soluções apresentam diversas alternativas relativamente ao sistema de deteção de peões e aviso de eventuais sinais de perigo. Deste modo, revela-se interessante entender os seus princípios de funcionamento como método de reflexão para a implementação que se pretende desenvolver.

2.7.1 *Smart Crosswalk - LED Solutions*

A solução apresentada pela empresa *LED Solutions* consiste num sistema com câmara de vídeo utilizado na deteção de peões, possibilitando a gravação de vídeo da área envolvente da passadeira e, assim, efetuar a recolha de dados em caso de acidente. O sistema de alimentação do sistema é constituído por um painel solar, inversor e bateria. A comunicação entre ambos os lados da passadeira é efetuada recorrendo a um transmissor sem fios.

O sistema de iluminação LED da passadeira, embutido com sensor de movimento, possibilita uma melhor visibilidade da área envolvente da passadeira, alertando os condutores da presença de um peão; além disso, existe ainda um sinal luminoso intermitente de alerta relativamente à presença de peões com a intenção de atravessar a passadeira.

Deste modo, a solução apresentada com vista à implementação de uma passadeira inteligente envolve um painel solar de 50 W, uma unidade de gestão (módulo de controlo, módulo de gestão energética e bateria), sensores infravermelho, sinal de passagem para peões retroiluminado, sistema de iluminação LED, transmissor sem fios e uma câmara de vídeo [63].

2.7.2 *Smart Pedestrian Crosswalk - Bercman Technologies*

A solução *Smart Pedestrian Crosswalk*, apresentada pela empresa *Bercman Technologies*, consiste num sistema com câmara de vídeo e sensores na monitorização de peões. A deteção de possíveis acidentes rodoviários é efetuada recorrendo a algoritmos de inteligência artificial, desenvolvidos com o intuito de prever a trajetória dos peões e, assim, gerar um sinal de alerta. Deste modo, o sistema alerta os peões com um sinal de áudio e os condutores com um sinal luminoso LED.

O sistema possibilita ainda a recolha de dados de tráfego rodoviário, como, por exemplo, classificação, velocidade e contagem de veículos, contagem de peões, gravação da área relativa à passadeira, medições de dados ambientais relacionados com a temperatura e humidade do ar, bem como concentração do nível de dióxido de carbono (CO₂).

A gestão dos dados relativos à passareira inteligente pode ser efetuada recorrendo a uma interface de utilizador, com a possibilidade de, remotamente, visualizar as condições técnicas dos equipamentos e dados estatísticos [64].

2.7.3 *SmartPass - Euroasfalt*

SmartPass é uma solução apresentada pela empresa *Euroasfalt*, desenvolvida com o intuito de proporcionar um atravessamento mais seguro das passareiras, alertando os condutores da presença de peões. A nível técnico esta solução apresenta um sistema de iluminação LED, sensores de deteção de movimento, aviso sonoro, medição da velocidade dos veículos, um módulo de monitorização e uma unidade de controlo central.

O módulo relativo à iluminação LED possibilita a emissão de um sinal de alerta luminoso para os condutores, sendo ativado automaticamente aquando a aproximação de um pedestre com a intenção de atravessar a passareira. O módulo de deteção de pedestres é constituído por sensores de movimento, gerando os sinais de alerta luminosos e de aviso sonoro. O módulo de aviso sonoro permite a notificação de peões através de mensagens de áudio, alertando para eventuais cenários de perigo. O sistema relativo ao módulo radar apresenta como finalidade a medição da velocidade dos veículos que se aproximam da passareira. O módulo de monitorização é constituído por um conjunto de câmaras de vídeo, permitindo a gravação da área envolvente da passareira, definindo-se como um método de recolha de informação em caso de acidente. A unidade de controlo central, provida de tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communications*), permite a intercomunicação entre módulos, bem como o envio de dados estatísticos para um servidor remoto e, assim, apresentar a informação numa interface de utilizador.

Esta solução permite ainda a implementação de um sistema de antiderrapagem de veículos, denominado ASE (*Anti Skid Euroasfalt*), sendo constituída por uma resina de poliuretano e bauxite de alta fricção, sendo aplicado na superfície rodoviária inerente à passareira como alternativa à redução da distância de travagem dos veículos, bem como prevenir cenários de velocidade excessiva [65].

Capítulo 3

Solução Proposta

Neste capítulo é apresentada a solução proposta e inerente processo de decisão que possibilitou a escolha dos componentes constituintes da mesma. Na primeira secção são abordados os requisitos do sistema. Na segunda secção é apresentada a arquitetura geral do sistema a desenvolver, de modo a estruturar de forma sucinta o funcionamento da solução. De seguida, apresenta-se a temática relacionada com a arquitetura de hardware, abordando-se o controlador do sistema, os sensores e a comunicação entre módulos. Na quarta secção é apresentada a arquitetura de software. Por fim, aborda-se o sistema de gestão energética.

3.1 Análise de requisitos

O objetivo deste trabalho envolve o desenvolvimento de uma solução que possibilite o controlo de uma passadeira. Deste modo, apresenta-se o seguinte conjunto de requisitos de funcionamento do sistema:

1. Módulo de Controlo:

- (a) Estabelecer uma rede de comunicação local e remota sem fios;
- (b) Leitura e processamento de dados de sensores;
- (c) Recolha de dados de dispositivos periféricos;
- (d) Envio de informação para uma interface gráfica de utilizador (GUI).

2. Controlador Periférico:

- (a) Estabelecer uma rede de comunicação local sem fios;

- (b) Leitura e processamento de dados de sensores relativos a peões e veículos;
- (c) Envio de dados para o módulo de controlo;
- (d) Atuação do sistema de iluminação de modo a indicar a direção de movimento dos peões, bem como a aproximação de um veículo;
- (e) Possibilidade de ajustar a intensidade do sistema de iluminação de acordo com a intensidade luminosa do local.

3. Sistema de Gestão Energético:

- (a) Estabelecer um sistema de alimentação tendo por base uma fonte de energia renovável;
- (b) Efetuar o armazenamento da energia recolhida recorrendo a baterias;
- (c) Efetuar a monitorização do consumo energético do sistema.

3.2 Arquitetura geral do sistema

De acordo com os objetivos do projeto e de modo a satisfazer os requisitos enunciados na secção anterior, é apresentada a arquitetura geral do sistema, como é possível observar na Fig. 3.1.

A arquitetura geral do sistema envolve a comunicação entre dois principais sistemas: o módulo de controlo, responsável pela aquisição de informação relativa aos restantes dispositivos do sistema e respetivo envio para uma aplicação *web* e os controladores periféricos, responsável pela aquisição dos dados de sensorização dos sensores IR (*Infrared*) e FSR (*Force Sensing Resistor*) e atuação do sistema de iluminação e aviso.

O módulo de controlo envolve um dispositivo que seja capaz de efetuar a leitura de um conjunto de sensores relativos à intensidade da luz solar, de modo a enviar a informação para os dispositivos periféricos e assim efetuar o controlo da intensidade luminosa do sistema de iluminação. Além disso, pretende-se ainda que este módulo envie a informação para uma interface gráfica de utilizador (GUI). O módulo de controlo envolve ainda o sistema de gestão energético, efetuando a recolha dos dados e respetiva monitorização.

A deteção do sentido de movimento dos peões é efetuada recorrendo aos dados de sensorização que, após serem processados por um algoritmo, possibilite a atuação do sistema de iluminação da passadeira de acordo com um conjunto de efeitos luminosos que indiquem o sentido em que os peões se encontrem a atravessar a passadeira. Além disso, estes módulos poderão ainda ser usados para a recolha de dados estatísticos, como a contagem do número de peões que atravessam a passadeira.

Os módulos periféricos encontram-se em cada lado da passareira de modo a efetuarem a leitura dos sensores e atuação do sistema de iluminação. Os módulos relativos ao dispositivo "Marcador LED - Aviso", como demonstrado na figura 3.1, apresentam como principal objetivo a deteção de veículos de modo a atuar o sistema de iluminação a nível da passareira, bem como a nível de sinalização luminosa para avisar os condutores da presença de uma passagem para peões. Além disso, estes módulos poderão ainda ser usados para a recolha de dados estatísticos, como a contagem do número de veículos e a respetiva velocidade de movimento.

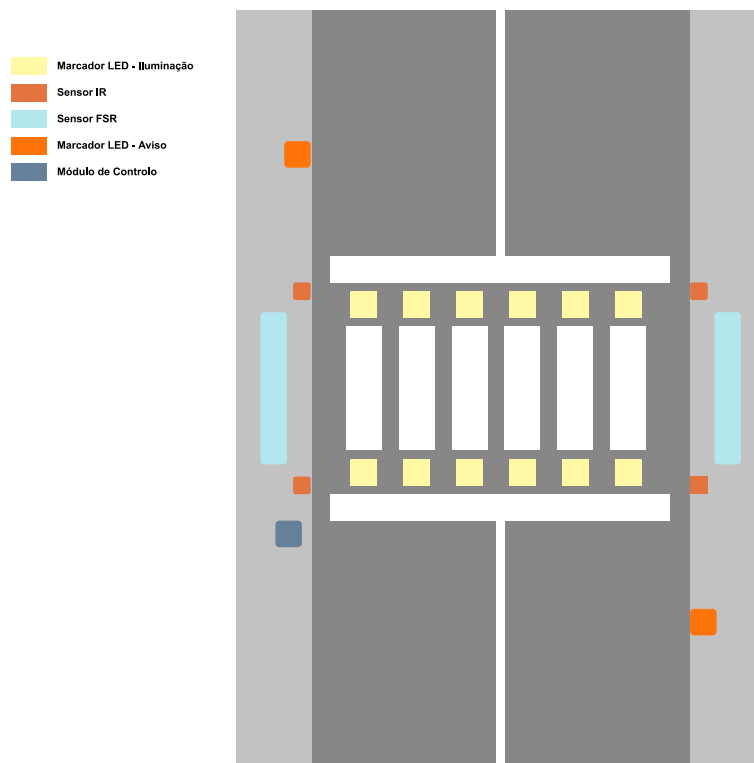


Figura 3.1: Arquitetura da Passadeira Inteligente

3.3 Arquitetura de *Hardware*

Nesta secção é abordada a arquitetura de *hardware*, apresentando-se as soluções a tomar relativamente ao controlador do sistema, os sensores e a comunicação entre módulos. A solução a desenvolver envolve a interação entre um conjunto de módulos relacionados com a aquisição de informação relativa a sensores e controlo de componentes constituintes do sistema.

3.3.1 Controlador do Sistema

A análise relativa ao controlador do sistema revela um conjunto diversificado de alternativas presentes no mercado. Deste modo, os microcontroladores apresentados inserem-se nas arquiteturas de 8 e 32 *bits*. A pesquisa efetuada apresenta em consideração um diversificado conjunto de parâmetros relacionado com a arquitetura, sinal de relógio (*clock*), RAM (*Random Access Memory*), *Flash*, número de temporizadores (*Timers*), interfaces de comunicação, bem como o custo de cada solução. Na tabela 3.1 é abordado sucintamente este conjunto de características.

Tabela 3.1: Comparação de diferentes microcontroladores.

Microcontrolador	Arquitetura	Clock	RAM	Flash	Timers	ADC	Interface	Preço
ATmega328PB [66]	8 <i>bit</i>	20 MHz	2 kB	32 kB	5	10 <i>bit</i>	USART, I ² C, SPI	5.07 \$ [67]
ATtiny84A [68]	8 <i>bit</i>	20 MHz	512 B	8 kB	2	10 <i>bit</i>	USART, I ² C, SPI	3.52 \$ [69]
STM8L052C6T6 [70]	8 <i>bit</i>	16 MHz	2 kB	32 kB	4	12 <i>bit</i>	USART, I ² C, SPI	2.00 \$ [71]
STM8S903K3T6C [72]	8 <i>bit</i>	16 MHz	1 kB	8 kB	2	10 <i>bit</i>	USART + LIN, I ² C, SPI	1.21 \$ [73]
STM32G030F6P6 [74]	32 <i>bit</i>	4-48 MHz	8 kB	64 kB	8	12 <i>bit</i>	USART + LIN, I ² C, SPI	0.98 \$ [75]
ESP32-WROOM-32D ¹ [76]	32 <i>bit</i>	80-240 MHz	520 kB	4 MB	4	12 <i>bit</i>	UART, I ² C, SPI, CAN2.0B [77]	3.60 € [78]
ESP32-C3 ¹ [79]	32 <i>bit</i>	80-160 MHz	400 kB	4 MB	2	12 <i>bit</i>	UART, I ² C, SPI, CAN2.0B [80]	1.95 € [81]

Nota: ¹Apresenta integração de *Wi-Fi* (IEEE 802.11 b/g/n) e *Bluetooth Low Energy* (BLE).

Através da observação da tabela anterior é possível constatar que as soluções presentes no mercado relativamente a microcontroladores com arquitetura de 32 *bits* revelam um conjunto de características computacionais superiores e um custo, em alguns casos, inferior a arquiteturas de 8 *bits*. Após a análise da oferta disponível, procedeu-se à escolha do microcontrolador ESP32-WROOM-32D, desenvolvido pela *Espressif*. A característica diferenciadora deste microcontrolador relativamente aos restantes envolve a integração de *Wi-Fi* e *Bluetooth*, sendo este o principal critério de seleção, dado que se pretende implementar uma rede de comunicação no controlo do sistema. Este é constituído por um microprocessador Xtensa de 32 bits com dois núcleos de processamento, sinal de relógio variável de 80MHz até 240MHz, 520kB de SRAM e memória SPI flash de 4MB. Apresenta um conjunto diversificado de interfaces como, por exemplo, I2C, I2S, UART, CAN2.0B, ADC (*Analog to Digital Converter*) de 12 *bits*, entre outros, operando a um nível lógico de 3.3V.

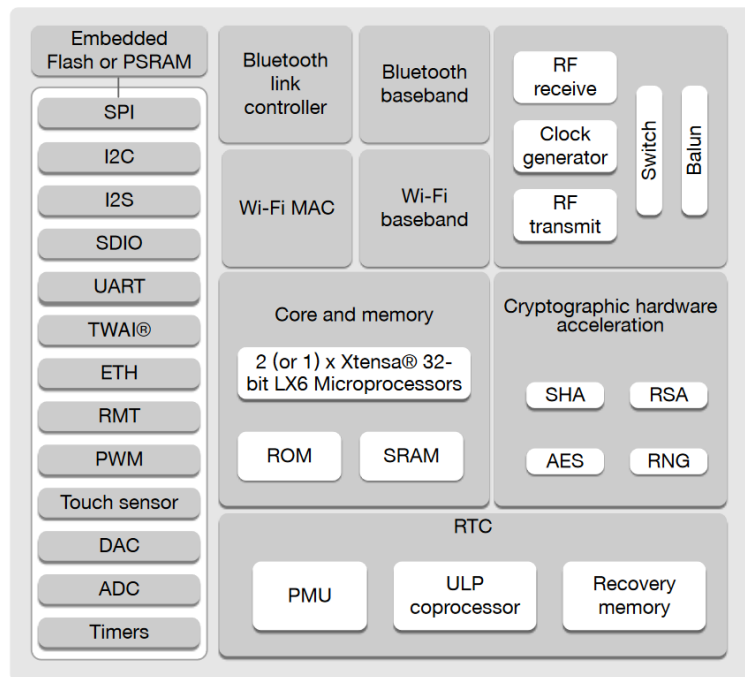


Figura 3.2: Diagrama funcional ESP32 [17]

3.3.2 Sensores

Nesta secção é abordada a temática relativa à componente de sensorização do sistema. Uma vez que se pretende efetuar a aquisição de informação do meio envolvente do sistema, é necessário efetuar a deteção de peões e veículos.

3.3.2.1 Force Sensing Resistor

Force Sensing Resistor (FSR) é um tipo de sensor que apresenta como principal característica a variação da sua resistência elétrica de acordo com a pressão exercida sobre a sua superfície. De um modo geral, quanto maior a força aplicada sobre a superfície do sensor, menor será a resistência, apresentando uma variação inversamente proporcional relativamente à força aplicada. A aplicação destes sensores é comum em interfaces homem-máquina ou máquina-máquina, apresentando um conjunto de características que irá depender do tamanho, forma e materiais utilizados no sensor; além disso, a sua utilização não se revela adequada para cenários em que se revele necessário a medição de uma força com elevada precisão. Na figura 3.3 apresenta-se a variação inversamente proporcional da resistência relativamente à força aplicada sobre a superfície do sensor [82].

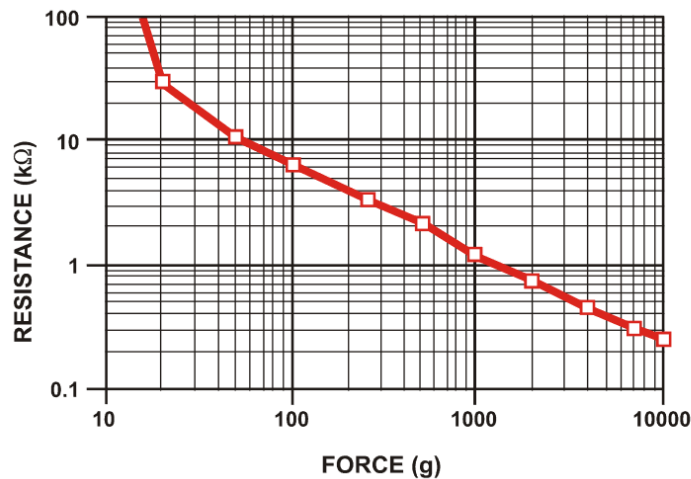


Figura 3.3: Resistência vs. Força [18]

A aquisição de sinal de um dispositivo FSR pode ser efetuada recorrendo a diferentes tipos de circuitos. Deste modo, é efetuada uma abordagem a possíveis circuitos elétricos comuns neste tipo de sensores.

A aquisição da força aplicada a um sensor FSR pode ser efetuada recorrendo a um simples circuito conversor de força em tensão, recorrendo a um simples divisor de tensão, como demonstrado na figura 3.4. O sinal de saída deste circuito, V_{OUT} é obtido recorrendo à equação 3.1.

A configuração de aquisição de sinal deste tipo resulta no aumento da tensão de saída V_{OUT} de acordo com o aumento da força aplicada sobre o sensor. Caso R_{FSR} seja trocada com R_1 a tensão de saída V_{OUT} irá diminuir de acordo com o aumento da força aplicada sobre o sensor. A resistência R_1 é dimensionada de acordo com o nível de sensibilidade relativo à força aplicada, bem como a limitação de corrente. Tendo em conta a impedância do circuito de medição da variação da tensão, poderá ser necessário a aplicação de um amplificador operacional seguidor de tensão com ganho unitário.

$$V_{OUT} = \frac{V_{CC} \cdot R_1}{R_1 + R_{FSR}} \quad (3.1)$$

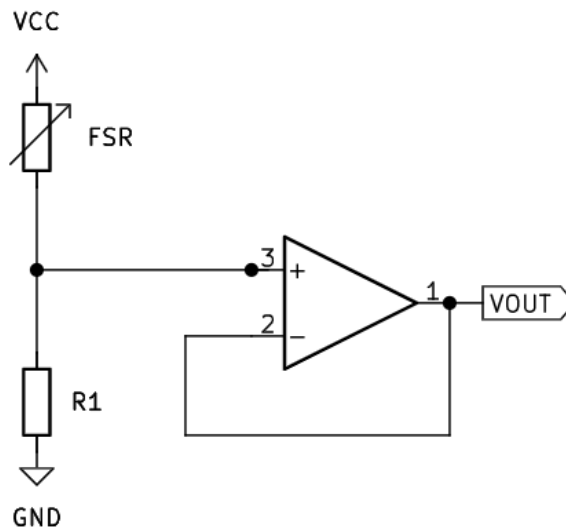


Figura 3.4: Divisor de Tensão

A aquisição do sinal do sensor FSR pode ser efetuada recorrendo a um circuito que funcione como um *switch*, isto é, possibilite a alteração da tensão de saída de acordo com um valor de força aplicada ao sensor específica. Assim, o circuito da fig 3.5 apresenta uma configuração constituída por um divisor de tensão e um amplificador operacional como comparador. A saída em tensão do amplificador operacional V_{OUT} varia entre um valor de tensão alto e baixo, sendo que quando o sensor não se encontra pressionado a saída V_{OUT} irá encontrar-se num nível de tensão baixo. Assim que a tensão da entrada não inversora exceder a tensão da entrada inversora, a tensão de saída V_{OUT} irá alterar para um nível de tensão alto. Deste modo, a especificação da tensão que efetue esta mudança de estado

de saída do amplificador operacional está correlacionada com o nível de força que se pretende adquirir no sensor FSR, sendo definida através da entrada inversora.

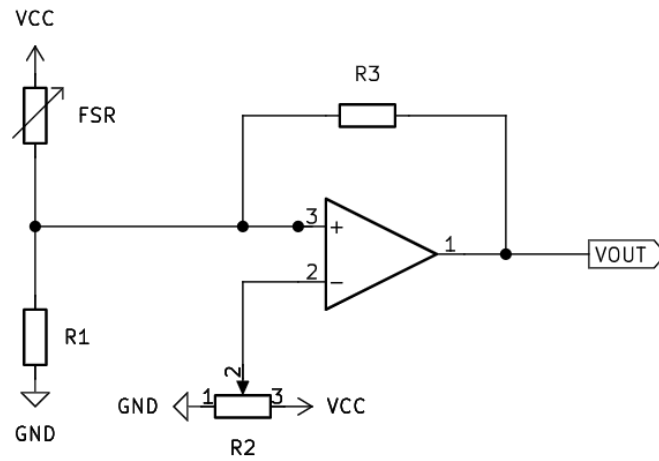


Figura 3.5: *Variable Force Threshold Switch*

3.3.2.2 Infravermelho

O desenvolvimento de um sensor fotoelétrico que possibilite a sensorização de um objeto envolve o dimensionamento de um circuito de emissão do sinal fotoelétrico e de um circuito de receção do mesmo. Como referido no capítulo anterior, é importante efetuar a modulação de um sinal fotoelétrico de modo que o circuito recetor seja resiliente relativamente a possíveis ruídos eletromagnéticos presentes no ambiente. Na fig 3.6 é apresentada a configuração de um sistema *thru-beam*, dado que se define como a solução a adotar no dimensionamento do sistema de deteção de pedestres.

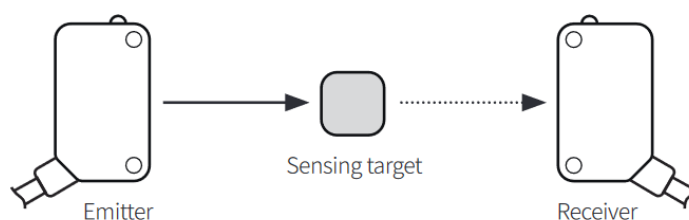


Figura 3.6: Circuito de sensorização fotoelétrica *thru-beam* [19]

3.3.3 Iluminação

A iluminação é uma questão de elevada importância no sistema a dimensionar, uma vez que irá efetuar o controlo da intensidade luminosa do sistema de iluminação da passadeira. Ao longo do dia a intensidade da luz solar varia de forma não linear, por razões relacionadas com fenómenos atmosféricos ou do local de implementação da passadeira. Além disso, é um aspeto importante na eficiência energética do sistema, uma vez que em eventuais cenários revela-se desnecessário a atuação de iluminação a um nível máximo de potência.

O dimensionamento do sistema responsável pelo controlo do nível de luminosidade envolve a necessidade de seleção de um sensor que possibilite a medição do nível de intensidade luminosa. Deste modo, o sensor a dimensionar poderá envolver um simples LDR (Light Dependent Resistor) ou um fotodíodo. O problema relacionado com este tipo de sensores é que apresentam um elevado nível de saturação comparativamente a um baixo nível de intensidade luminosa, sendo necessário efetuar um conjunto de procedimentos que possibilitem a calibração do sensor para diferentes níveis de intensidade luminosa. Tendo em conta que o sistema a desenvolver envolve uma aplicação em áreas que apresentam um contacto direto com o a luz solar, a medição da intensidade luminosa apresenta valores que podem variar dos 2 klx a 10 klx em dias com nuvens, até valores de 50 klx a 100 klx em dias com céu limpo e luz solar direta [83]. O dimensionamento de um circuito de condicionamento de sinal, utilizando como sensor um fotodíodo, é

apresentado na figura 3.7. Na equação 3.2 apresenta-se o cálculo relativo à tensão de saída, V_{OUT} , do circuito de condicionamento de sinal.

$$V_{OUT} = -I_{SC} \cdot R_1 \cdot \left[1 + \frac{R_2}{R_3} \right] \quad (3.2)$$

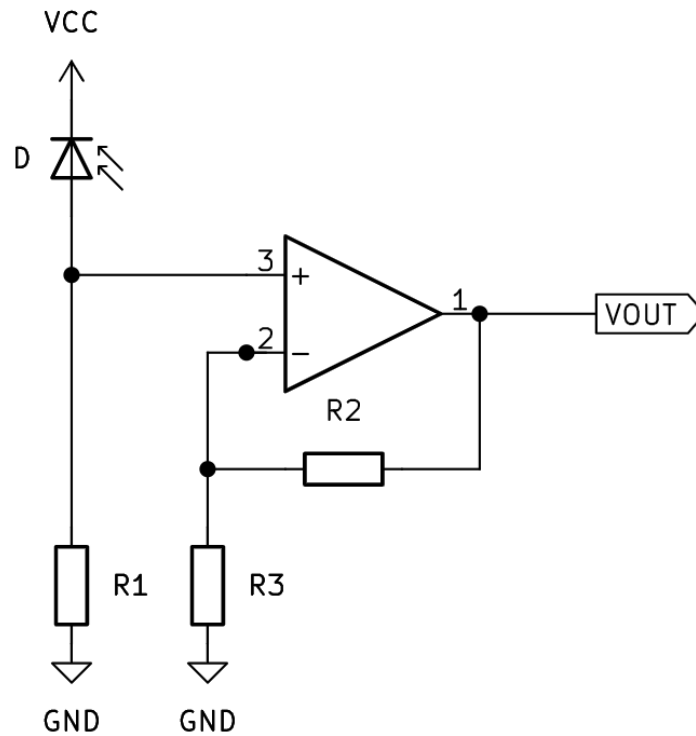


Figura 3.7: Montagem não inversora com polarização inversa

A utilização deste circuito elétrico envolve a análise de um conjunto de fatores relativos à intensidade da luz solar, apresentando como principal adversidade a saturação do sensor. Assim, a utilização deste tipo de circuitos envolve a determinação de um intervalo de valores de intensidade luminosa em que se pretenda que o sensor atue de forma linear e sem saturação. Além disso, é ainda importante a calibração do sensor com um dispositivo de referência para que seja possível caracterizar a zona de funcionamento do mesmo e, também, a possibilidade de converter o sinal de tensão obtido numa unidade de medida de intensidade luminosa (lux).

A aquisição da intensidade de uma fonte de luz também pode ser efetuada recorrendo a sensores digitais, possibilitando, através de um protocolo de comunicação, a aquisição dos valores de intensidade luminosa. Na tabela 3.2 é apre-

sentando um conjunto de sensores digitais, sendo abordados parâmetros relativos à iluminância, interface e tensão de funcionamento.

Tabela 3.2: Comparação de diferentes sensores digitais de luminosidade.

Sensor	Iluminância	Interface	Tensão
OPT3001 [84]	0.01-83 klx	I ² C	1.6-3.6 V
BH1750 [85]	1-65536 lx	I ² C	3.3-5.0 V
VEML7700 [86]	0-120 klx	I ² C	2.5-3.6 V
TSL2591 [20]	0-88 klx	I ² C	2.7-3.6 V

3.3.4 Comunicação

A comunicação revela-se como um dos pontos de maior importância do sistema, uma vez que irá possibilitar a gestão da rede de sensores e atuação de dispositivos. O dimensionamento do sistema de comunicação envolve duas principais vertentes: o desenvolvimento da rede local, recorrendo à utilização da tecnologia ESP-NOW, tem como principal objetivo a comunicação bidirecional entre o controlador principal e os periféricos e o desenvolvimento de uma rede tendo por base a tecnologia Wi-Fi e que, recorrendo ao protocolo de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), efetue o envio da informação para um servidor que possibilite a análise da informação.

3.3.4.1 ESP-NOW

ESP-NOW é um protocolo de comunicação sem fios desenvolvido pela *Espressif Systems* que opera na gama espectral das rádio frequências sem licença, nomeadamente na frequência com valor de 2.4 GHz. A informação é encapsulada numa trama de dados específica, possibilitando a encriptação de informação através do protocolo CCMP (*Counter Mode Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol*) [87]. Na figura 3.8 e 3.9 apresenta-se a estrutura da trama de dados utilizada pelo protocolo ESP-NOW, definindo-se do seguinte modo:

- **MAC Header:** Endereço MAC (*Media Access Control*) do dispositivo, com um comprimento de 24 *bytes*;
- **Category Code:** Valor definido pelo fabricante (127), indicando a categoria da trama de dados;

- **Organization Identifier:** Identificador único definido recorrendo aos primeiros 3 *bytes* do endereço MAC;
- **Random Value:** Valor definido para prevenir ataques do tipo *relay* (Segurança);
- **Vendor Specific Content:** Campo de dados da trama de informação;
- **FCS (Frame Check Sequence):** Código de deteção de erros da trama de dados.

MAC Header	Category Code	Organization Identifier	Random Values	Vendor Specific Content	Frame Check Sequence
24 bytes	1 byte	3 bytes	4 bytes	7 ~ 255 bytes	4 bytes

Figura 3.8: Trama de dados ESP-NOW

A componente relativa ao campo de dados da trama de informação define-se do seguinte modo:

- **Element ID:** Valor definido pelo fabricante (221), indicando o elemento da trama de dados;
- **Length:** O comprimento dos campos relativos ao *Organization Identifier*, *Type*, *Version* e *Body*;
- **Organization Identifier:** Identificador único definido recorrendo aos primeiros 3 *bytes* do endereço MAC;
- **Type:** Valor definido pelo fabricante (4), indicando uma trama de dados do tipo ESP-NOW;
- **Version:** Versão do protocolo ESP-NOW;
- **Body:** Campo relativo à informação a transmitir.

Element ID	Length	Organization Identifier	Type	Version	Body
1 byte	1 byte	3 bytes	1 byte	1 byte	0 ~ 250 bytes

Figura 3.9: Trama de dados ESP-NOW

3.3.4.2 Wi-Fi

A tecnologia Wi-Fi, como mencionado no capítulo anterior, é detalhada pela norma IEEE 802.11a/b/g/n, possibilitando a implementação de uma rede de comunicação sem fios na gama espectral das rádio frequências de 2.4 GHz e 5 GHz. A implementação deste protocolo no microcontrolador ESP32-WROOM-32D apresenta a possibilidade deste funcionar como uma estação, conectando-se a um AP (*Access Point*) ou como um AP; além disso permite ainda a utilização de protocolos de segurança como o WEP, WPA e WPA2, estabelecendo a comunicação sem fios através da utilização da rádio frequência de 2.4 GHz [88].

3.3.4.3 MQTT

O protocolo de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), desenvolvido nos finais da década de 1990 pela IBM (*International Business Machines Corporation*), apresentou como primeira aplicação a interligação de gasodutos via satélite. A arquitetura do protocolo MQTT é fundamentada no princípio *Publish/Subscribe*, possibilitando a utilização do protocolo de segurança SSL/TLS, da pilha protocolar TCP/IP, assegurando a comunicação entre dispositivos de forma encriptada e segura [89].

O modelo *Publish/Subscribe* envolve a definição de dois tipos de dispositivos: *Publisher* é o dispositivo que envia a informação e o *Subscriber* é o dispositivo que recebe a informação, sendo necessário a implementação de um outro dispositivo mediador, denominado *Broker*, na gestão e processamento das mensagens da rede de comunicação, uma vez que não existe comunicação direta entre um dispositivo *Publisher* e um dispositivo *Subscriber*. A utilização deste modelo permite um processamento de mensagens orientado ao evento, bem como a definição de rotas de comunicação mais eficientes e, assim, melhorar as características de escalabilidade do sistema [90]. Deste modo, apresenta-se a definição dos seguintes conceitos:

- **Broker** - controlo e filtragem de mensagens, bem como gestão de funcionalidades relacionadas com a autenticação e controlo de sessão dos clientes, e armazenamento de tópicos e mensagens não enviadas em caso de falha de conectividade do sistema.
- **Cliente** - apresenta a possibilidade de ser definido como *Publisher* ou *Subscriber* de um determinado tópico, estabelecendo a conexão com o *Broker* através de uma rede de comunicação.

No protocolo MQTT o nível QoS (*Quality of Service*) representa o compromisso entre o tempo de envio de uma mensagem e o grau de confiança da sua correta receção [90]. Deste modo, existe a possibilidade de definir 3 níveis QoS:

- **QoS 0:** Mensagem enviada uma única vez e sem qualquer confirmação de receção;
- **QoS 1:** Mensagem enviada e com aviso de receção. Caso ocorra a falha no envio de uma mensagem o sistema procederá ao reenvio da mesma, podendo-se verificar a receção de mensagens repetidas;
- **QoS 2:** Mensagem enviada e com aviso de receção através da técnica *four-way handshake*. A utilização deste método garante que a possibilidade de mensagens repetidas é nula.

A implementação do protocolo MQTT no microcontrolador ESP32 é denominada ESP-MQTT, possibilitando a sua implementação através das tecnologias TCP (*Transmission Control Protocol*) e *Websockets*, bem como a utilização de mecanismos de segurança como o protocolo SSL (*Secure Sockets Layer*)/TLS (*Transport Layer Security*) e restantes funcionalidades do protocolo MQTT [91].

3.3.5 Sistema de Gestão Energético

A implementação de um sistema de gestão energético é um aspeto crucial quando se pretende efetuar a recolha de energia através da utilização de fontes de energia renovável. A energia solar é convertida em energia elétrica através da utilização de um painel fotovoltaico, sendo necessário proceder ao seu armazenamento através da utilização de baterias. De modo a efetuar a gestão do ciclo de carga das baterias e a garantir a máxima eficiência do painel fotovoltaico, revela-se necessário projetar um circuito de controlo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), de modo a garantir a máxima eficiência do sistema. A alimentação dos diferentes componentes do sistema pode envolver a necessidade de diferentes níveis de tensão de alimentação, podendo este fator ser assegurado através da utilização de reguladores de tensão lineares ou recorrendo a conversores DC/DC. Na figura 3.10 apresenta-se a arquitetura geral do sistema de gestão energético.

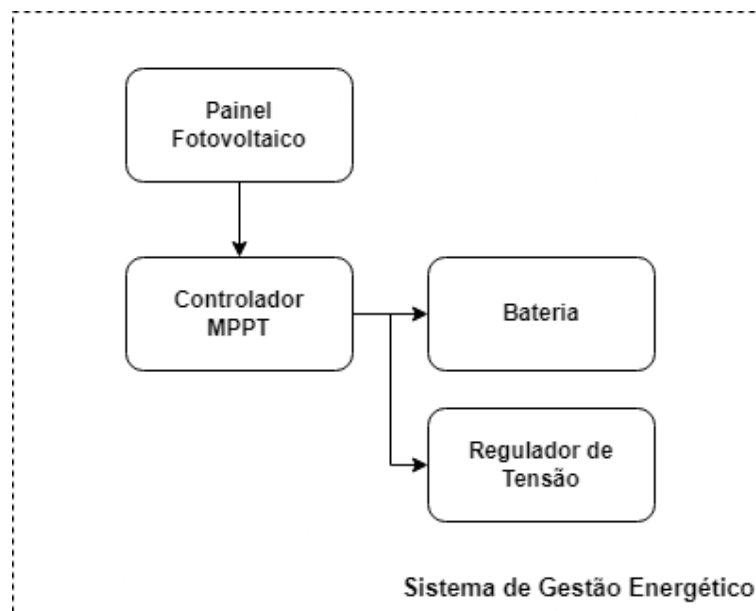


Figura 3.10: Arquitetura do Sistema de Gestão Energético

3.4 Arquitetura de *Software*

O *software* desenvolvido ao longo deste projeto é uma componente fundamental para o correto funcionamento da solução proposta. Nesta secção pretende-se efetuar a descrição do funcionamento geral do *software*, sendo que, no capítulo 4, aborda-se a implementação do código com exemplos práticos.

A programação do microcontrolador ESP32-WROOM-32 foi desenvolvida recorrendo à *framework* ESP-IDF (*Espressif IoT Development Framework*), possibilitando o desenvolvimento do código na linguagem de programação C [92].

O desenvolvimento do *software* envolve duas principais componentes: a configuração das funcionalidades em utilização pelo microcontrolador, envolvendo o estabelecimento de uma rede local sem fios, tendo por base a tecnologia Wi-Fi e ESP-NOW, bem como o processamento dos dados dos sensores e atuação no sistema de iluminação, correspondendo a um controlo de baixo nível e a configuração de uma interface de utilizador (GUI), recorrendo à tecnologia Node-RED, possibilitando a visualização dos dados obtidos através da leitura dos sensores, correspondendo a um controlo de alto nível. O módulo de controlo é o dispositivo responsável pelo envio da informação para a interface gráfica de utilizado, através da tecnologia Wi-Fi, recorrendo a um *broker* MQTT (Eclipse Mosquitto) [93]. Na figura 3.11 e 3.12 apresenta-se o diagrama de blocos da arquitetura de *software*.

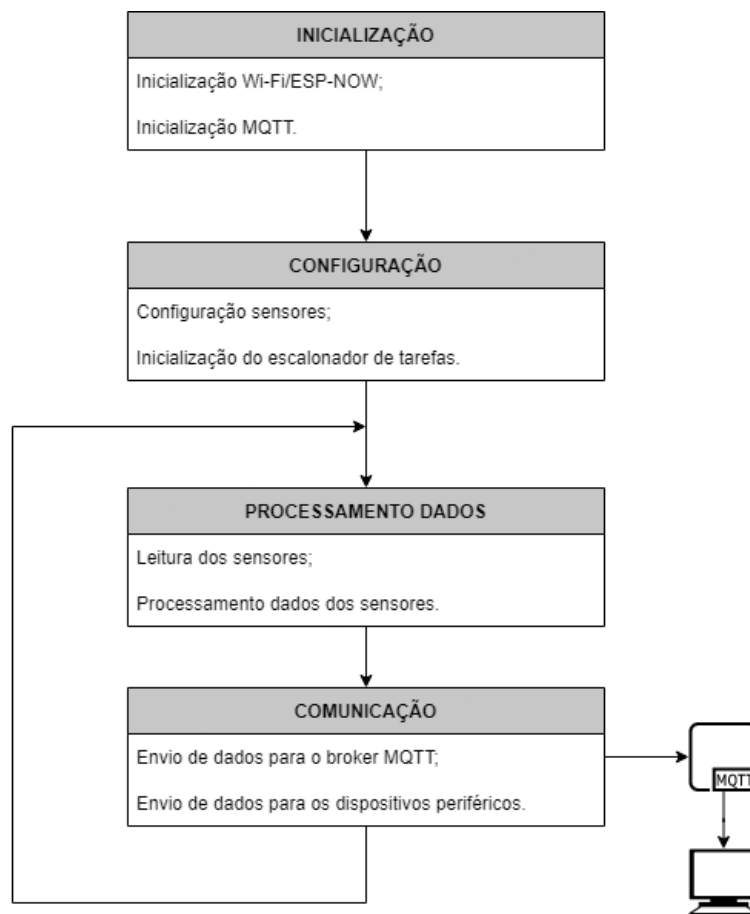
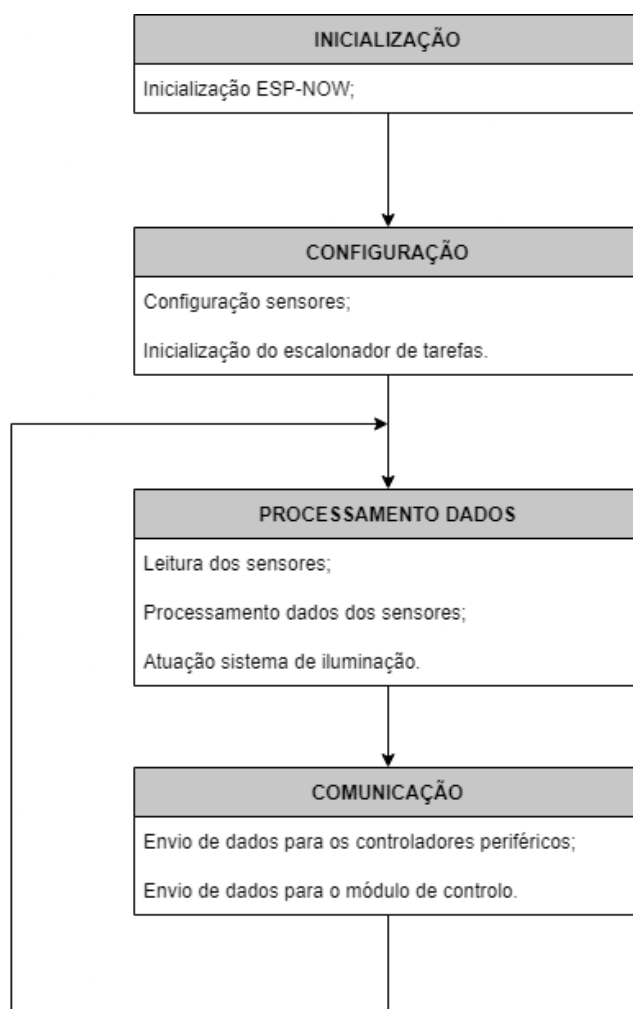


Figura 3.11: Arquitetura de *Software* do Módulo de Controlo

Figura 3.12: Arquitetura de *Software* do Módulo Periférico

Capítulo 4

Implementação

Neste capítulo é abordada a implementação da solução proposta no capítulo 3. A secção 4.1 envolve a arquitetura de hardware do sistema, abordando implementação do circuito de aquisição de dados dos sensores e atuação do sistema de iluminação. Na secção 4.2 é abordada a arquitetura de software, sendo efetuada uma abordagem da leitura e configuração dos sensores, o controlo do sistema de iluminação e o envio e apresentação dos dados numa interface gráfica de utilizado (GUI). Na última secção é apresentada a arquitetura do sistema de gestão energético.

4.1 Hardware

A arquitetura de *hardware* do sistema a implementar pode ser dividida num conjunto de subsistemas que efetuam a comunicação entre si. A implementação dos sensores relativos à sensorização de peões e veículos não foi possível de ser efetuada, contudo apresentam-se possíveis soluções de sensorização, bem como a implementação das funcionalidades via *software* para a receção deste tipo de informação.

O módulo de controlo, constituído pelo controlador principal (ESP32), efetua a comunicação através da rede ESP-NOW com os restantes dispositivos da rede local, sendo responsável pela receção de diversos dados relacionados com a passadeira inteligente. Efetua a comunicação com um servidor externo via Wi-Fi, através da utilização do protocolo MQTT. Na figura 4.1 apresenta-se a arquitetura geral do controlador principal.

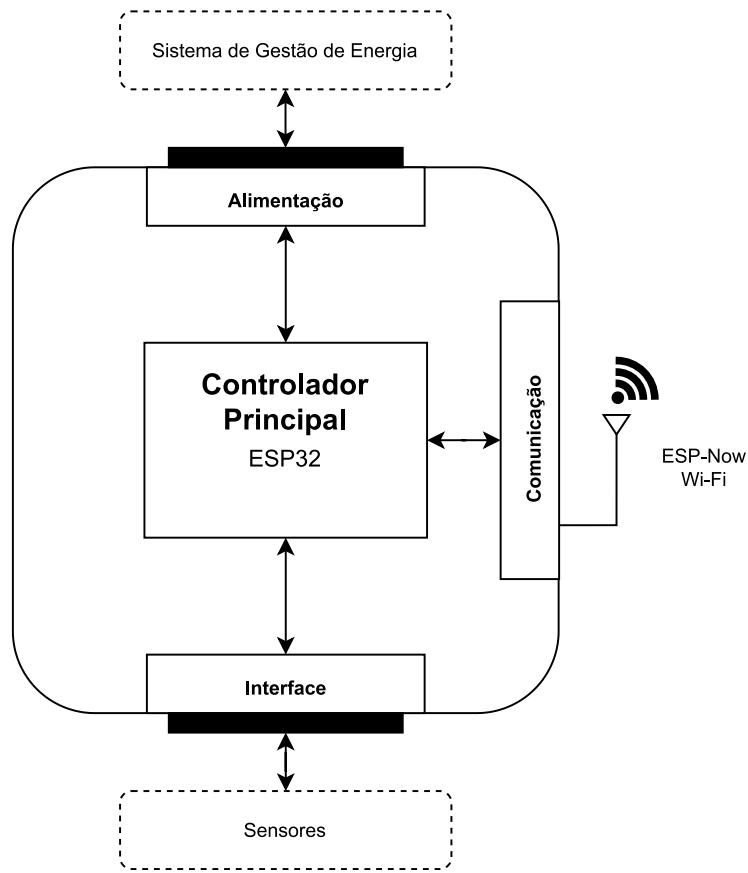


Figura 4.1: Controlador Principal

O controlador periférico, constituído pelo microcontrolador ESP32, é responsável pela aquisição dos dados relativos aos sensores que efetuam a deteção de peões e veículos, possibilitando atuar o sistema de iluminação e aviso, bem como a sincronização do sistema de sensorização de cada lado da passadeira. Além disso, efetua o envio de informação relativa à sensorização da passadeira para o módulo de controlo. Na figura 4.2 apresenta-se a arquitetura geral do controlador periférico.

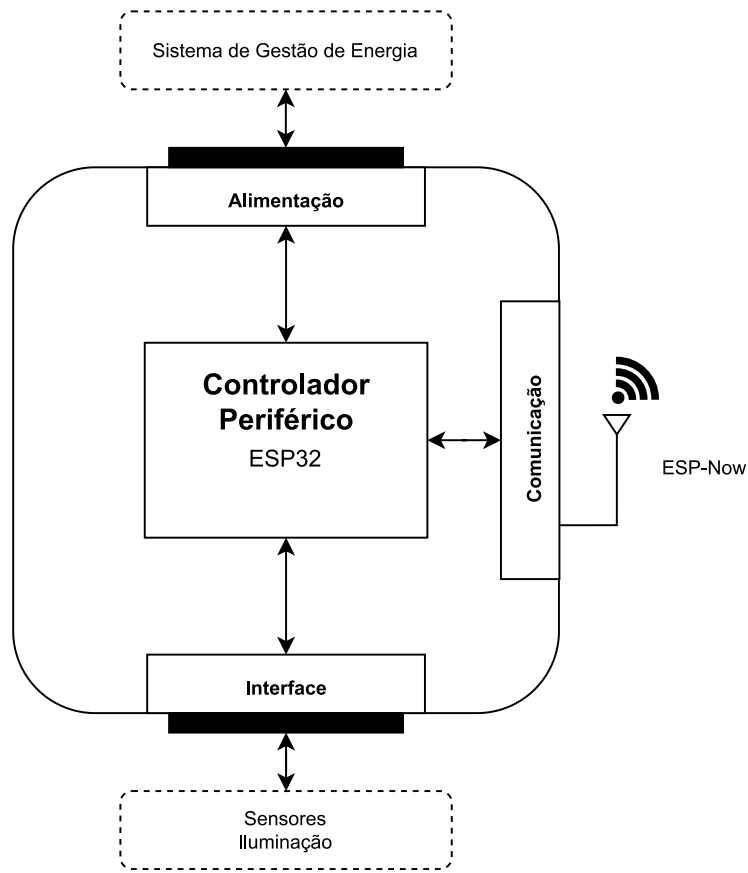


Figura 4.2: Controlador Periférico

4.1.1 Sensores

A implementação relativa à sensorização do sistema envolve a definição dos diferentes tipos de sensores e os respectivos circuitos que possibilitem a aquisição e respetivo processamento de informação. Deste modo, é apresentada a definição dos circuitos relativos à componentes de sensorização tendo por base a tecnologia FSR e infravermelhos. Dado que não foi possível a aplicação física destes circuitos, é apresentada a modelação de uma possível solução.

4.1.1.1 Force Sensing Resistor

A aquisição de sinal de um dispositivo FSR, como referido no capítulo anterior, pode ser efetuada recorrendo a diferentes tipos de circuitos. Assim, é apresentado a modelação de um circuito do tipo *switch*, ou seja, apresenta a variação da tensão de saída entre um nível de tensão baixo e alto de acordo com o valor de força aplicada no sensor.

O primeiro estágio deste circuito é constituído pela resistência R_{FSR} e R_1 . A

variação do valor da resistência R_{FSR} irá causar a variação da tensão na entrada não inversora do amplificador operacional, de acordo com a equação 4.1. O estágio relativo ao amplificador operacional é constituído por um circuito divisor de tensão, na entrada inversora, relativo às resistências R_4 e R_5 , possibilitando definir o valor de tensão de referência, de acordo com a equação 4.2, e assim efetuar a comparação com o valor de tensão na entrada não inversora. Deste modo, assim que o valor na entrada não inversora do amplificador operacional apresentar um valor igual ou superior a 1.65 V, a saída do amplificador operacional apresentará um valor de tensão alto.

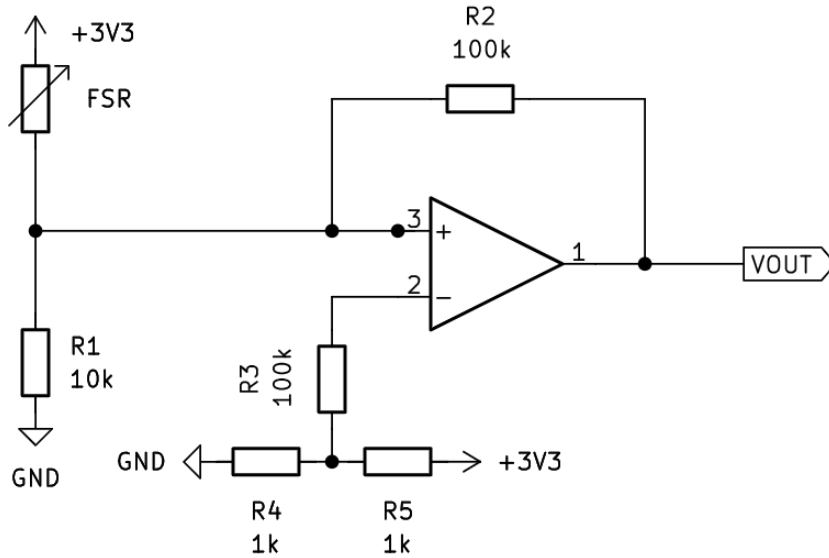


Figura 4.3: Circuito condicionamento de sinal do sensor FSR

$$V_{IN} = 3.3 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{FSR}} \quad (4.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{REF} = 3.3 \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_5} \\ V_{REF} = 3.3 \cdot \frac{1k}{1k + 1k} \\ V_{REF} = 3.3 \cdot \frac{1k}{2k} \\ V_{REF} = 1.65V \end{array} \right. \quad (4.2)$$

4.1.1.2 Infravermelho

O dimensionamento de um sensor fotoelétrico que possibilite a sensorização de um objeto envolve o desenvolvimento de um circuito relativo ao dispositivo emissor e

recetor, como mencionado no capítulo anterior. Assim, apresenta-se um circuito um circuito emissor com modulação de um sinal fotoelétrico e o respetivo circuito recetor.

O dispositivo emissor envolve o dimensionamento de um sinal fotoelétrico modulado, através da utilização do circuito integrado NE555 [94], possibilitando obter à saída uma onda quadrada na qual podem ser definidos parâmetros relativos à sua frequência e *duty-cycle*. Deste modo, dimensiona-se o circuito integrado NE555 no modo de operação *astable*, recorrendo às equações 4.3 e 4.4, obtendo-se à saída um sinal de onda quadrada com uma frequência de 38 kHz, *duty-cycle* de 51.36 %, sendo que a tensão varia entre os valores de 0 e 5 V. À saída do NE555 é atuado um díodo emissor infravermelho, TSAL4400 [95], com um comprimento de onda de 940 nm. O circuito recetor IR é constituído pelo módulo TSOP38238, otimizado para a receção de sinais fotoelétricos do espectro eletromagnético infravermelho com modulação, de modo a evitar interferências de possíveis ruídos eletromagnéticos. O módulo TSOP38238 [96] apresenta uma saída do tipo *active-low*, acionando o transistor 2N2222A [97]. Assim, o seu funcionamento pode ser definido do seguinte modo: sempre que não se encontra nenhum objeto a obstruir o sinal modulado entre o circuito emissor e recetor, a saída do módulo TSOP38238 apresenta um nível de tensão baixo e, assim, V_{OUT} é definido com um nível lógico alto. A obstrução do sinal modulado entre os dois dispositivos irá originar um nível de tensão alto no módulo TSOP38238, atuando o transistor 2N2222A, definindo V_{OUT} com um nível de tensão baixo.

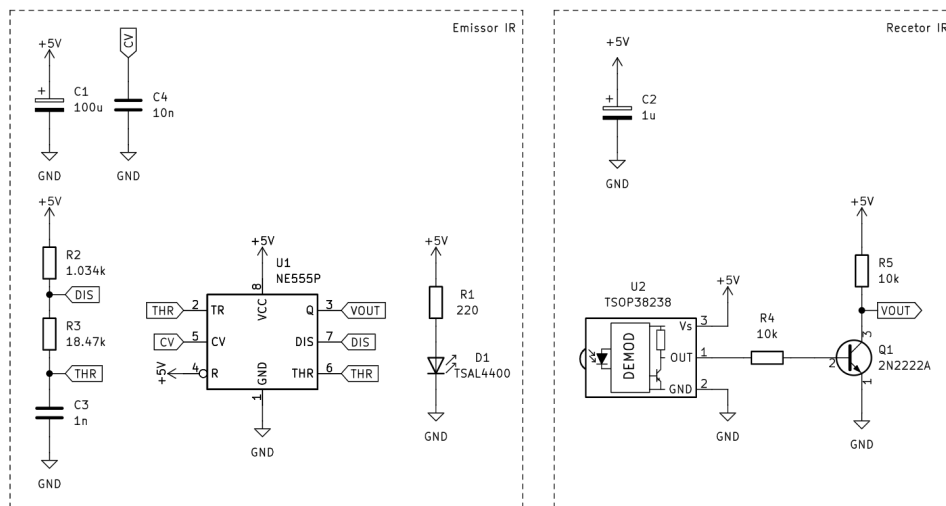


Figura 4.4: Circuito emissor e recetor IR

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{1.44}{(R_2+2 \cdot R_3) \cdot C_3} \\ F = \frac{1.44}{(1.034k+2 \cdot 18.47k) \cdot 1n} \\ F = 38 \text{ kHz} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D = 1 - \frac{R_3}{(R_2+2 \cdot R_3)} \\ D = 1 - \frac{18.47k}{(1.034k+2 \cdot 18.47k)} \\ D = 51.36\% \end{array} \right. \quad (4.4)$$

4.1.2 Iluminação

A iluminação da passareira inteligente define-se como um dos aspetos de maior importância da solução a desenvolver, uma vez que possibilitará a iluminação do ambiente circundante da mesma. Como referido na secção 3.3.3, a intensidade solar é um parâmetro de poder variar por diversas razões, sejam atmosféricas ou relativa ao local de implementação da passareira. Assim, o controlo da intensidade da luz solar é uma temática de elevado interesse relativamente a questões relacionadas com a eficiência energética.

Na secção 2.3.1 foram abordados diferentes tipos de tecnologias de redes de comunicação cabladas. Inicialmente, um dos objetivos envolvia o controlo da intensidade luminosa da passareira através um controlador individual para cada módulo de iluminação, dedicado à receção de uma trama de mensagens, atuando no sistema de iluminação. O dimensionamento de um sistema deste tipo envolve a necessidade de uma vasta quantidade de microcontroladores. Supondo que a passareira é constituída por 8 módulos de iluminação em cada lado, seriam necessários 16 microcontroladores no controlo da iluminação. A necessidade de um elevado número de microcontroladores é um aspeto a considerar, dada a situação atual relativa à crise dos semicondutores, tornando-se, em certas aplicações, impossível efetuar a aquisição destes dispositivos. Deste modo, procede-se ao dimensionamento de um solução alternativa que possibilite atuar o sistema de iluminação, através de um sinal PWM. A solução apresentada envolve a utilização do *transceiver* MAX485 [98], utilizado em redes de comunicação RS-485. O objetivo deste circuito é possibilitar que o sinal *PWM*, à saída do microcontrolador ESP32, seja convertido num nível de tensão diferencial, com o intuito de minimizar a interferência de ruído eletromagnético e atenuação do sinal ao longo da linha de transmissão. Dado que se pretende utilizado o número mínimo de *transceivers*, é necessário o desenvolvimento de um mecanismo que permita a seleção das diferentes linhas de transmissão do sinal *PWM* que irá atuar nos respetivos módulos de iluminação individuais. A solução para esta questão poderá envolver a utilização dos *switchs* analógicos MAX14759 ou CD4066B que possibilitam a transmissão de sinais de tensão bipolares [99, 100]. Na figura 4.5 é

apresentada o circuito relativo à transmissão do sinal PWM em duas linhas de transmissão balanceadas.

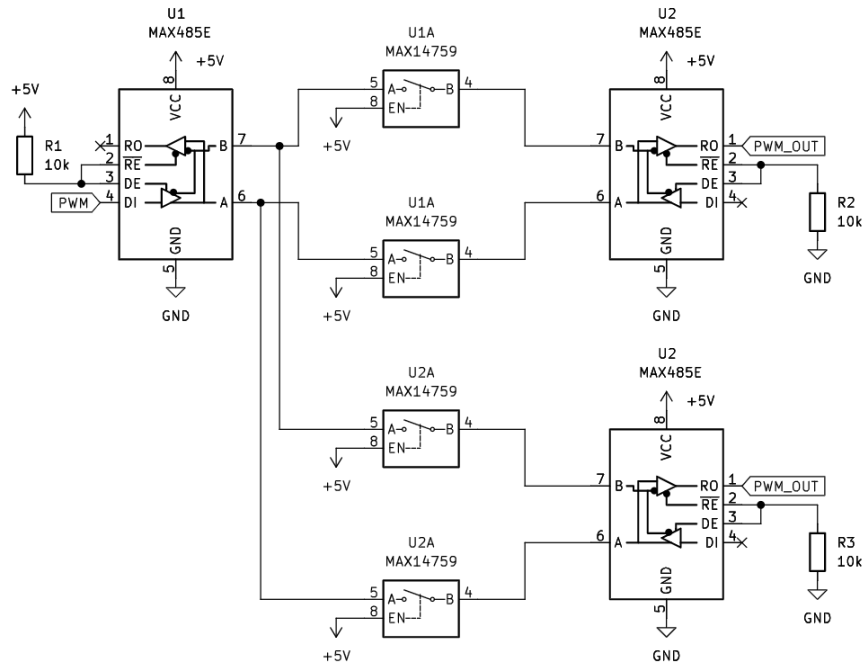


Figura 4.5: Circuito relativo à transmissão do sinal PWM

O sistema responsável pela aquisição do nível de intensidade da luz solar pode ser efetuado recorrendo a um sensor digital. Os sensores digitais apresentados na secção 3.3.3, apresentam um conjunto de parâmetros que satisfazem as condições necessárias para a solução a implementar. Assim, procede-se à descrição da solução adotada, o sensor TSL2591, uma vez que se define como o sensor disponível à data para a demonstração da solução. É ainda importante referir que o sensor BH1750 apresenta um custo menor relativamente ao sensor TSL2591, sendo que a sua implementação seria satisfatória para o sistema de controlo da luminosidade da passadeira.

O sensor TSL2591 é um sensor digital que possibilita a aquisição dos valores da intensidade luminosa através do protocolo de comunicação I²C. O circuito de aquisição do sinal luminoso envolve a utilização de dois fotodíodos, sendo que um apresenta uma resposta espectral na gama do espectro eletromagnético visível e infravermelho e, outro fotodíodo apresenta uma resposta no espectro eletromagnético do infravermelho. Deste modo, recorrendo a dois ADC, efetua a conversão do sinal obtido nos fotodíodos num sinal digital que possibilite a medição do valor de irradiância do local, na unidade SI (Sistema Internacional

de Unidades) - lux [20]. Na figura 4.6 apresenta-se a resposta espectral de cada fotodíodo, definindo-se CH0 como o fotodíodo correspondente à gama do espectro eletromagnético visível e infravermelho e CH1 o fotodíodo correspondente à gama do espectro eletromagnético do infravermelho.

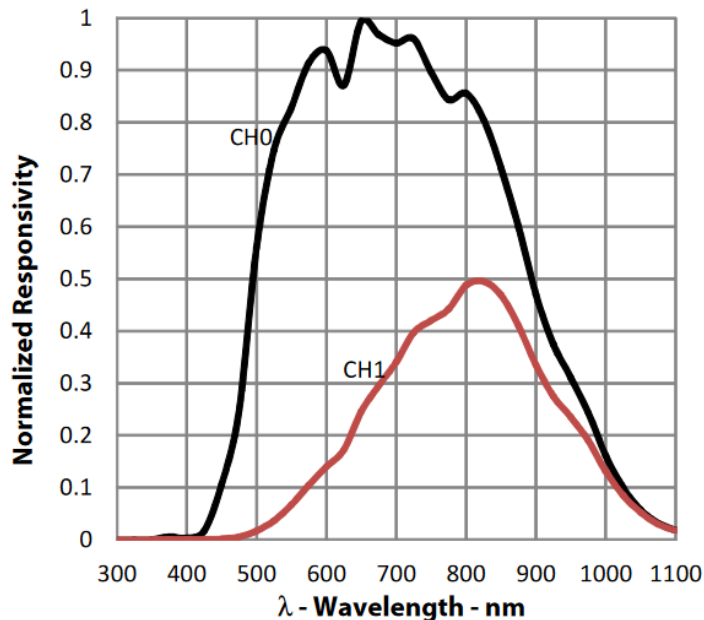


Figura 4.6: Resposta espectral do sensor TSL2591 [20]

4.2 Software

O desenvolvimento do *software* envolve a implementação da rede comunicação Wi-Fi e ESP-NOW, a configuração de sensores, a implementação do protocolo de comunicação MQTT, bem como a interface gráfica de utilizador (GUI). A implementação do *software* no dispositivo ESP32-WROOM-32 apresenta a utilização de funcionalidades relativas ao sistema operativo de tempo real *FreeRTOS*, sendo que o seu funcionamento apresenta por base um escalonador de tarefas em tempo real [101].

Inicialmente, efetua-se uma abordagem do funcionamento do módulo de controlo e dos módulos periféricos, seguindo-se, de forma mais detalhada, do princípio de funcionamento da rede de comunicação ESP-NOW, do sistema de controlo de iluminação, do protocolo de comunicação MQTT e da interface gráfica de utilizador.

O módulo de controlo envolve a inicialização e configuração do periférico de rádio frequência no modo Wi-Fi e ESP-NOW, seguindo-se da definição dos

parâmetros de configuração da rede ESP-NOW e do protocolo MQTT. De seguida, é efetuada a inicialização das tarefas relativas ao sensor de luminosidade (TSL2591), sensor de temperatura/humidade (DHT11) [102] e monitorização energética (INA219). Além disso, é ainda efetuada a inicialização de tarefas relativas ao processamento da informação recebida via ESP-NOW. Por fim, é efetuado o envio de informação para a interface gráfica de utilizador. Na fig 4.7 apresenta-se o processo de inicialização e configuração do módulo de controlo.

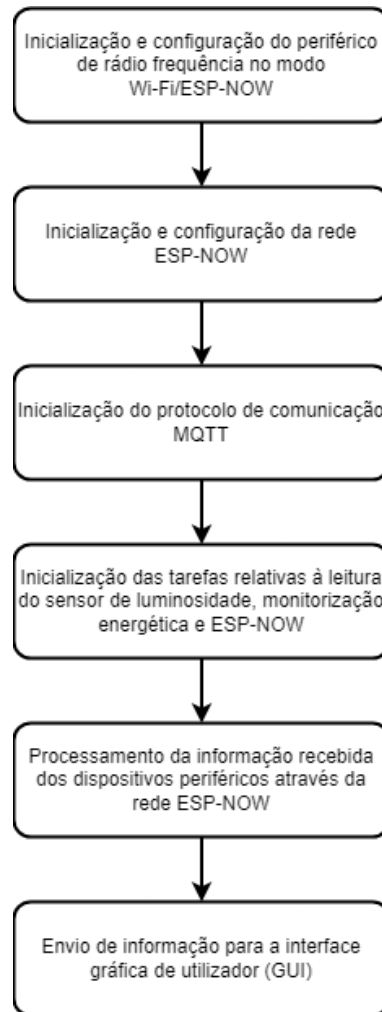


Figura 4.7: Processo de inicialização e configuração do módulo de controlo

O módulo periférico envolve a inicialização e configuração do periférico de rádio frequência no modo ESP-NOW, seguindo-se da definição dos parâmetros de configuração da rede ESP-NOW. De seguida, efetua-se a inicialização das tarefas relativas à sensorização de peões/veículos e respetivo processamento de informação trocada entre dispositivos periféricos. Por fim, é efetuada a atuação

do sistema de iluminação e o envio e recepção de informação para o módulo de controlo. Na fig 4.8 apresenta-se o processo de inicialização e configuração do módulo periférico.

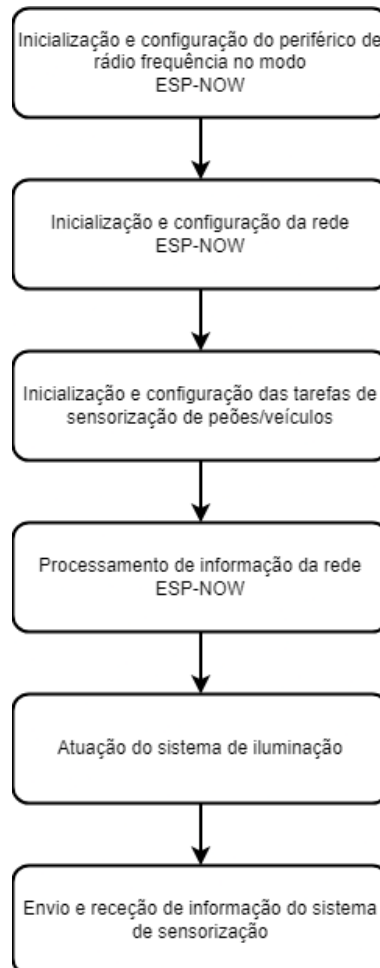


Figura 4.8: Processo de inicialização e configuração do módulo periférico

4.2.1 ESP-NOW

A implementação da rede de comunicação ESP-NOW envolve a configuração do periférico responsável pela transmissão de informação via rádio-frequência, bem como a implementação da tarefa responsável pela recepção e envio de informação.

Efetuada a configuração do periférico de rádio frequência, procede-se à inicialização das funções de *callback*, nomeadamente a função de *callback* de envio e recepção de mensagens. As suas funcionalidades envolvem a capacidade do dispositivo verificar se a transmissão da mensagens foi efetuada com sucesso (*callback* de envio) ou se existe alguma informação a ser recebida, efetuando o envio dessa

informação para um *queue*.

A inicialização dos *queues* possibilitam o controlo do fluxo de informação, dado que serão os mecanismos utilizados para o envio e receção de informação. Por fim, a inicialização das tarefas relativas à receção e envio de informação que possibilitam o controlo dos *queues* relativos ao fluxo de informação. Além disto, o funcionamento destas tarefas apresenta por base um ciclo infinito, efetuando o bloqueio da tarefa enquanto não existe fluxo de informação. Na figura 4.9 apresenta-se o princípio de funcionamento da rede de comunicação ESP-NOW.

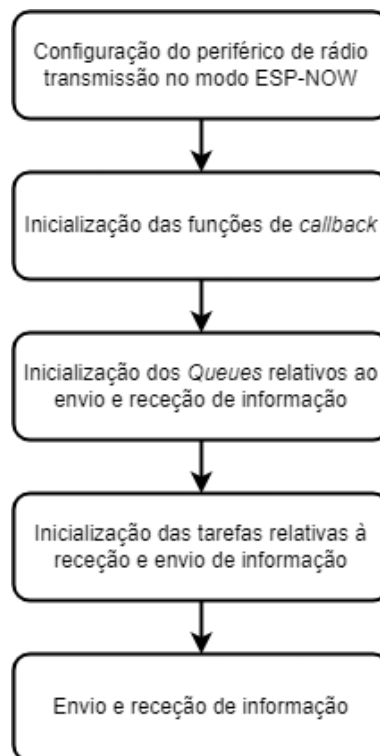


Figura 4.9: Processo de configuração e transmissão de dados da rede ESP-NOW

4.2.2 Iluminação

A implementação do sistema de iluminação envolve a configuração dos GPIOs (*General Purpose Input/Output*) relativos às interrupções externas, sendo atuados através dos sensores de deteção de movimento de peões. De seguida, é inicializado o *timer* PWM e as tarefas relativas à atuação do sistema de iluminação. O funcionamento destas tarefas tem por base um ciclo infinito, atuando o sistema de iluminação sempre que o estado de um sensor se altere ou ocorra a receção de dados via ESP-NOW. Assim, recorrendo a um algoritmo de processamento de informação é efetuado o controlo da iluminação da passadeira, implementando-se um conjunto de sinais luminosos que indicam o sentido de travessia de peões. A

intensidade luminosa da passadeira é efetuada recorrendo à leitura da intensidade luminosa do local, através da configuração e leitura do sensor TSL2591, sendo que esta tarefa é efetuada pelo módulo de controlo, efetuando o envio da informação para os dispositivos periféricos. Na figura 4.10 apresenta-se o processo de configuração e atuação do sistema de iluminação.

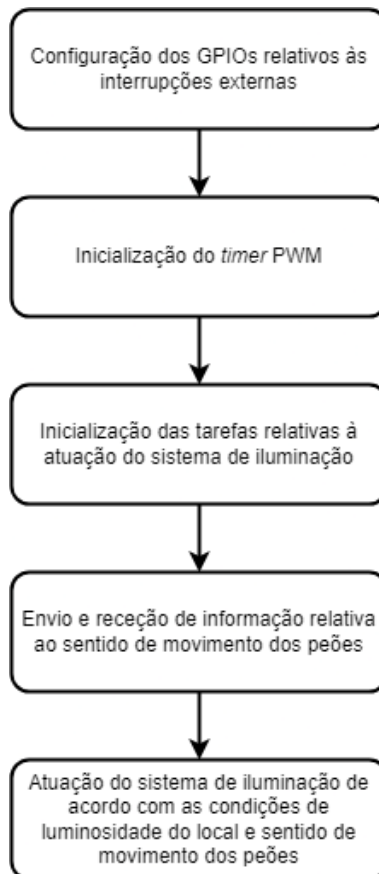


Figura 4.10: Processo de configuração e atuação do sistema de iluminação

Os controladores periféricos relativos à deteção de veículos e atuação do sinal luminoso apresentam o mesmo princípio de funcionamento apresentando no parágrafo anterior. Deste modo, sempre que é detetado um veículo é efetuada a atuação do sinal luminoso de aviso e de iluminação da passadeira.

4.2.3 MQTT

A implementação do protocolo de comunicação MQTT envolve a inicialização e configuração do periférico de rádio frequência no modo Wi-Fi. De seguida, é efetuada a inicialização e configuração do protocolo MQTT, definindo-se o URI do *broker* MQTT. Por fim, é efetuada a inicialização das tarefas relativas ao

processamento de informação, bem como o seu envio para o *broker* MQTT. Na figura 4.11 apresenta-se o processo de inicialização e configuração do protocolo MQTT.

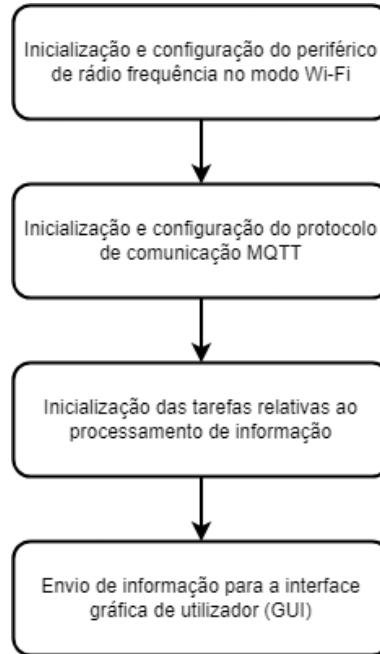
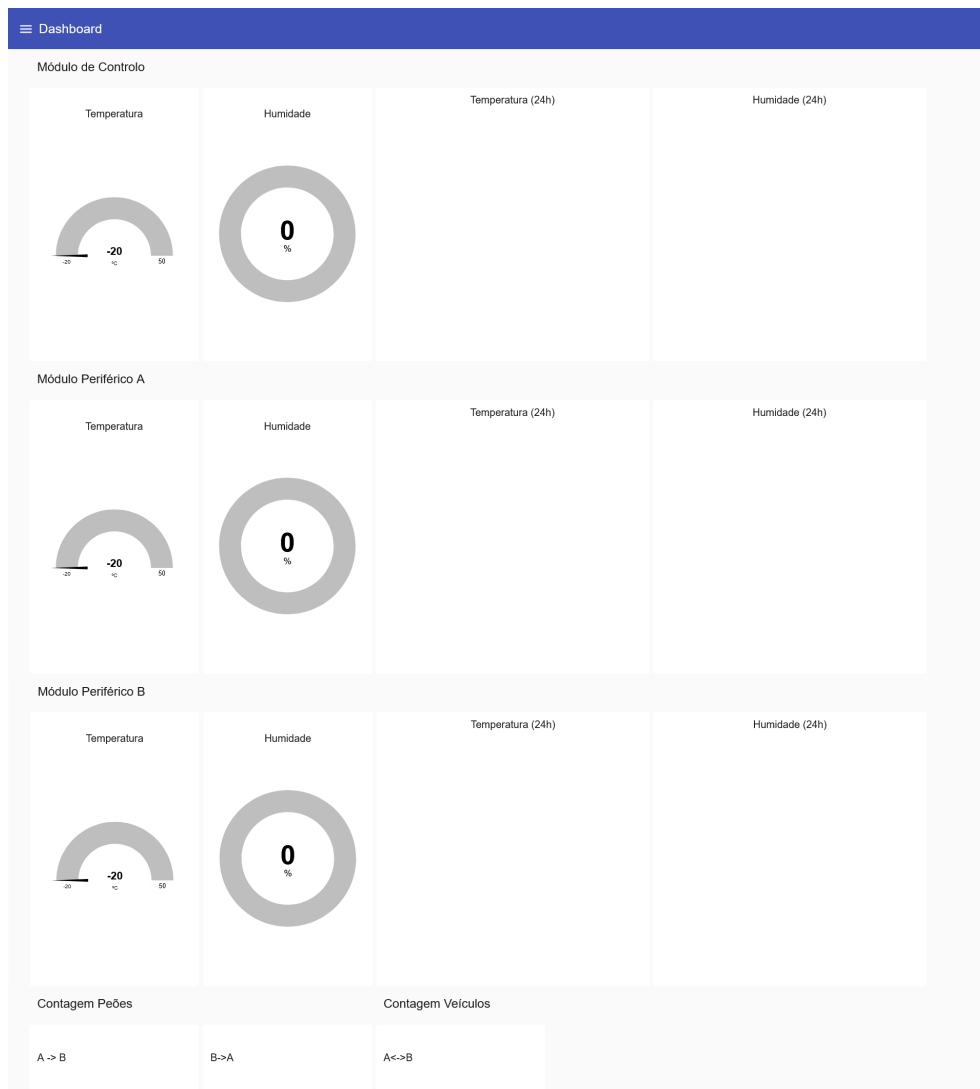


Figura 4.11: Processo de inicialização e configuração do protocolo MQTT

4.2.4 Interface de Utilizador

O controlo de alto nível, utilizando a tecnologia Node-RED como metodologia de programação, apresenta a interface de utilizador, sendo constituída por duas principais interfaces - a *dashboard* (Fig.4.12), que possibilita visualizar os dados relativos à leitura dos valores de temperatura e humidade dos módulos de controlo e periférico, bem como a contagem do número de peões e veículos. A interface relativa à energia (Fig.4.13), possibilita apresentar os dados relativos à medição dos parâmetros de tensão, corrente e potência, efetuada pelo sensor INA219, do painel fotovoltaico e bateria.

Figura 4.12: Interface de Utilizador - *Dashboard*

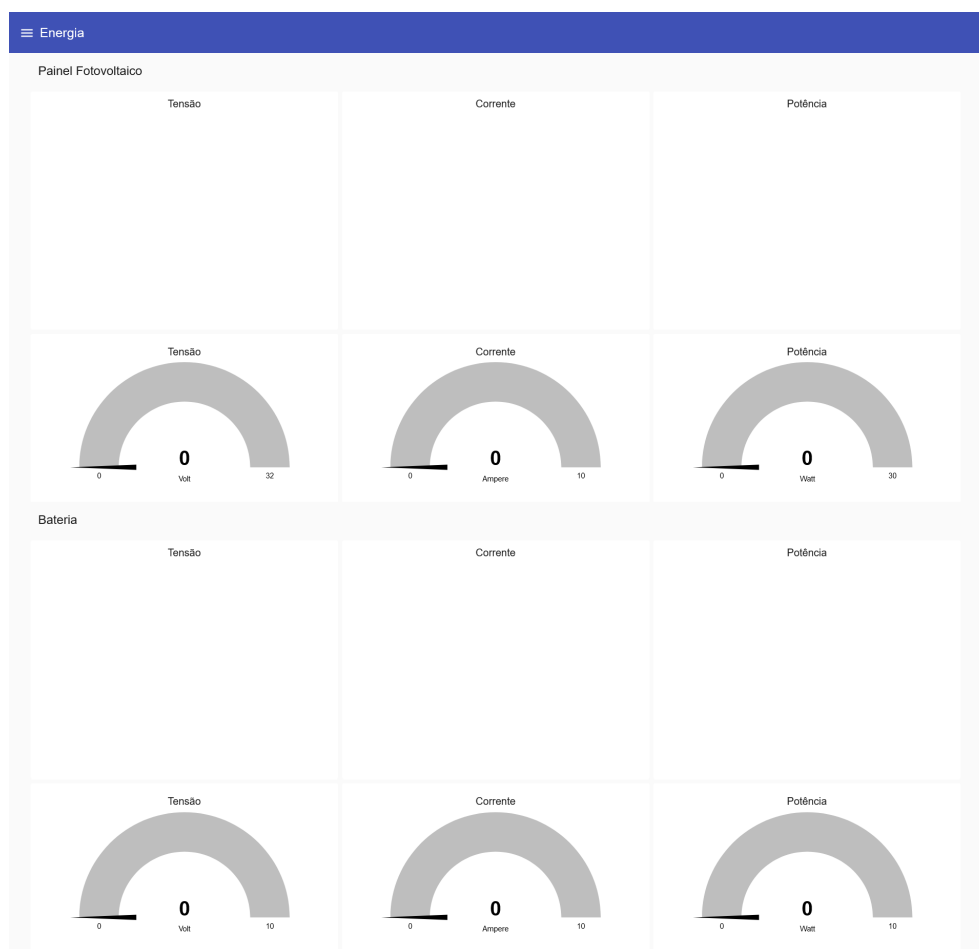


Figura 4.13: Interface de Utilizador - Energia

4.3 Sistema de Gestão Energético

A implementação do sistema de gestão energético abordado no capítulo anterior envolve a seleção de um conjunto de componentes relacionado com a conversão da energia solar em energia elétrica através de um painel fotovoltaico e o respectivo armazenamento em baterias, sendo por isso utilizado um circuito de controlo MPPT. Dado que não foi possível a implementação deste sistema, efetua-se uma abordagem de uma possível solução para o mesmo. Além disso, a correta implementação deste circuito envolve a análise do consumo energético de todo o sistema de controlo da passadeira inteligente, sendo que o circuito de gestão energético a abordar irá ser apresentado como uma possível solução geral a implementar neste sistema.

- **Painel Fotovoltaico** - Painel solar policristalino de 60W, com uma tensão de 18.2V à potência máxima [103].
- **Controlador MPPT** - baseado no circuito integrado LT8490, desenvolvido pela *Analog Devices*, permite o carregamento de diversos tipos de baterias (*Lead Acid*, LiFePO₄, Li-Ion, Li-Polymer), fazendo a gestão do ciclo de carregamento das baterias através de um controlador MPPT, de modo a garantir máxima eficiência. Os valores de tensão de entrada podem variar dos 6-80 V, com a possibilidade de carregar baterias com tensões de saída que podem variar dos 1.3-80 V. Além disso, apresenta um princípio de funcionamento do tipo *buck-boost*, permitindo uma tensão de entrada superior, igual ou inferior à tensão de saída para o carregamento de baterias [21].

O circuito da figura 4.15 apresenta uma aplicação típica do circuito integrado LT8490, apresentando a possibilidade de serem efetuados ajustes de parâmetros relacionados com o corrente de entrada/saída e tensão de entrada/saída. Deste modo, através da utilização de um painel solar como fonte de alimentação, a função MPPT utiliza como parâmetro de ajuste a tensão de entrada de forma a obter o ponto de operação em torna da potência máxima, sendo que o parâmetro relacionado com a corrente de entrada possibilita a limitação da corrente máxima admitida pela fonte de alimentação. Os parâmetros relacionados com a tensão e corrente de saída permitem definir a tensão e corrente máxima de carregamento da bateria. O pino TEMPSENSE, conectado ao circuito divisor de tensão constituído pelo termistor e acoplado à bateria, permite o ajuste do carregamento tendo em conta parâmetros relacionados com a temperatura ou como método de segurança no caso da bateria não se encontrar dentro dos limites de temperatura relativos ao seu correto funcionamento.

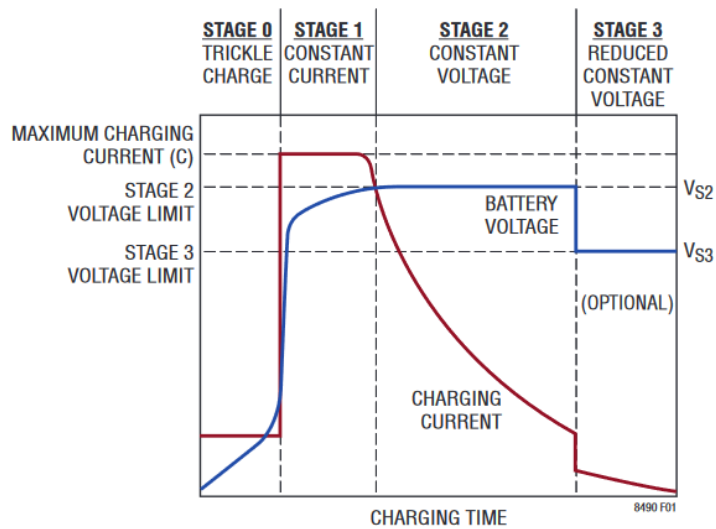


Figura 4.15: Perfil típico de carregamento LT8490 [21]

A monitorização da produção energética do painel fotovoltaico, bem como o nível de carregamento e consumo das baterias, é um aspeto interessante para uma possível avaliação da capacidade de autossuficiência do sistema de alimentação. Deste modo, procede-se à utilização do circuito integrado INA219 (Fig.4.16), desenvolvido pela *Texas Instruments*.

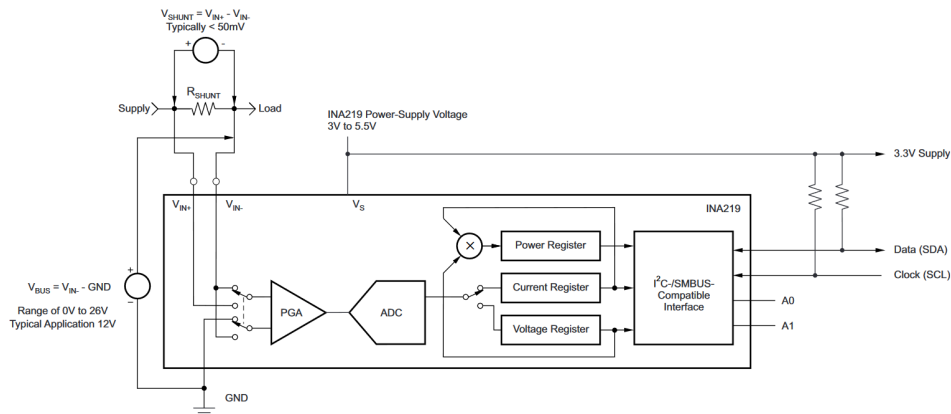


Figura 4.16: Esquema elétrico do sensor INA219 [22]

O INA219 é um medidor bidirecional de potência e corrente, possibilitando a aquisição de valores relativos à tensão, corrente e potência elétrica. De modo a adquirir as respetivas grandezas, é constituído por um PGA (*Programmable*

Gain Amplifier), adquirindo os valores analógicos recorrendo a um ADC de 12 *bits*, possibilitando a medição de valores de tensão que podem variar entre os 0-26 V. O valor máximo de medição de corrente elétrica é definido de acordo com a resistência *shunt* (R_{SHUNT}) e do PGA. A disponibilização dos dados relativos às respetivas grandezas de medição elétrica é efetuada através do protocolo de comunicação I²C, com a possibilidade de ser efetuada a programação de 16 endereços de comunicação, apresentando compatibilidade com microcontroladores de nível lógico 3.3-5 V [22].

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são abordados os resultados obtidos relativos à implementação proposta no 4. A secção 5.1 envolve um conjunto de simulações relativas aos circuitos de sensorização. Na secção 5.2 apresenta-se os diferentes cenários de funcionamento do sistema relativos à rede de comunicação ESP-NOW. Por fim, é abordada a interface gráfica de utilizador, apresentando os diferentes resultados obtidos do sistema de sensorização.

5.1 Simulações

A implementação física do sistema de sensorização não foi possível de ser efetuada, como mencionado na secção 4.1.1. Deste modo, procede-se a um conjunto de simulações de modo a caracterizar o funcionamento dos circuitos de sensorização, recorrendo ao *software* LTspice, desenvolvido pela *Analog Devices*. Além disso, é ainda importante referir que alguns componentes dos circuitos apresentados na secção 4.1.1 não se encontram disponíveis neste *software*, pelo que foram substituídos por componentes equivalentes.

5.1.1 Force Sensing Resistor

O circuito relativo à aquisição de sinal do sensor FSR (Fig.5.1), abordado na secção 4.1.1, é possível de ser caracterizado recorrendo ao circuito de simulação apresentado na figura 4.1.1. De modo a representar o comportamento de um sensor FSR, é definido o parâmetro *.step param R 100000 1 1000*, possibilitando a variação do valor da resistência R_1 do valor de $100k\Omega$ a 1Ω , em decrementos de 1000Ω , de modo a simular a variação do valor da resistência aquando exercida pressão sobre a superfície do sensor FSR. Tendo em conta que as resistências R_4 e

R_5 representam um circuito de divisor de tensão e, apresentando o mesmo valor, o sinal de referência na entrada inversora será $1/2$ de V_{CC} , ou seja, 1.65 V.

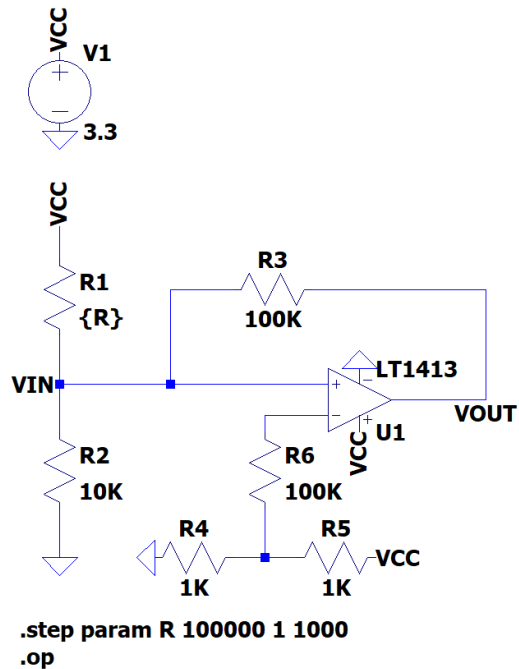


Figura 5.1: Circuito condicionamento de sinal do sensor FSR

Deste modo, observando os resultados da simulação obtida na figura 5.2, é possível verificar que à medida que R_1 diminui, o valor de V_{IN} aumenta, sendo que, a saída V_{OUT} é alterada para um nível lógico alto (3.3 V) assim que V_{IN} for igual ou superior a 1.65 V. Assim, o sinal obtido através deste circuito pode ser lido por uma GPIO de um microcontrolador, através de um ADC (*Analog to Digital Converter*) ou uma interrupção externa.

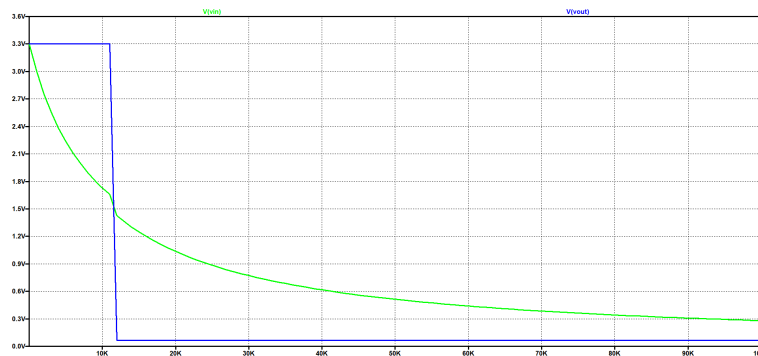


Figura 5.2: Simulação do circuito de condicionamento de sinal do sensor FSR

5.1.2 Infravermelho

O circuito relacionado com o sensor fotoelétrico (Fig.5.4) envolve a modulação do sinal emitido pelo diodo emissor infravermelho através de uma onda quadrada com frequência de 38 kHz, de modo a ser recebida por um recetor IR, como mencionado na secção 4.1.1. Deste modo, procede-se à simulação do circuito recorrendo à definição dos parâmetros do circuito integrado NE555 no modo de operação *astable*. O sinal obtido à saída, V_{OUT} , pode ser observado na figura 5.4, apresentando uma onda quadrada com frequência de 38 kHz.

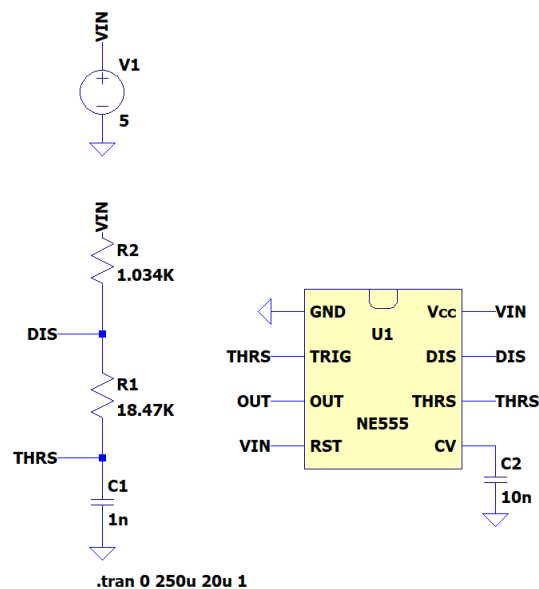


Figura 5.3: Circuito condicionamento de sinal do sensor FSR

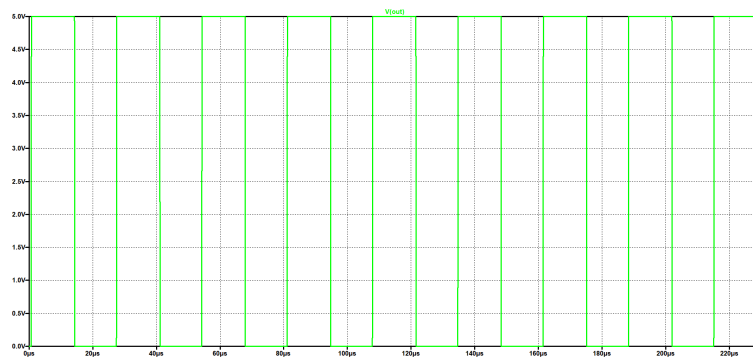


Figura 5.4: Simulação do circuito de condicionamento de sinal do sensor FSR

5.1.3 Iluminação

A solução relativa ao controlo da intensidade luminosa do sistema de iluminação da passadeira, apresentada na secção 4.1.2, envolve a conversão do sinal lógico PWM num sinal de tensão diferencial, sendo depois necessário ser reconvertido para um sinal lógico PWM de modo a atuar a intensidade do sistema de iluminação. Deste modo, na figura 5.5 é apresentada uma linha de transmissão, constituída pelos *transceivers* LTC2862 e os *switchs* analógicos ADG1412. Na figura 5.6 é apresentando o sinal V_{PWM} à saída do microcontrolador e o sinal V_{OUT_A} à saída do *transceiver* pertencente ao módulo de iluminação, atuando o transistor Q_1 . Deste modo, o sinal V_{OUT_B} poderá atuar no circuito relativo à alimentação dos sistema de iluminação.

O circuito relativo ao transistor possibilita a conversão do nível lógico à saída do *transceiver*, dado que quando as linhas de transmissão se encontram desconnectadas, a saída apresenta um nível lógico de tensão alto. Assim, quando não é pretendido que o sistema de iluminação seja atuado, o *transceiver* apresentará um nível de tensão alto, atuando no transistor Q_1 , originando no sinal V_{OUT_B} um nível de tensão baixo, desligando o sistema de iluminação.

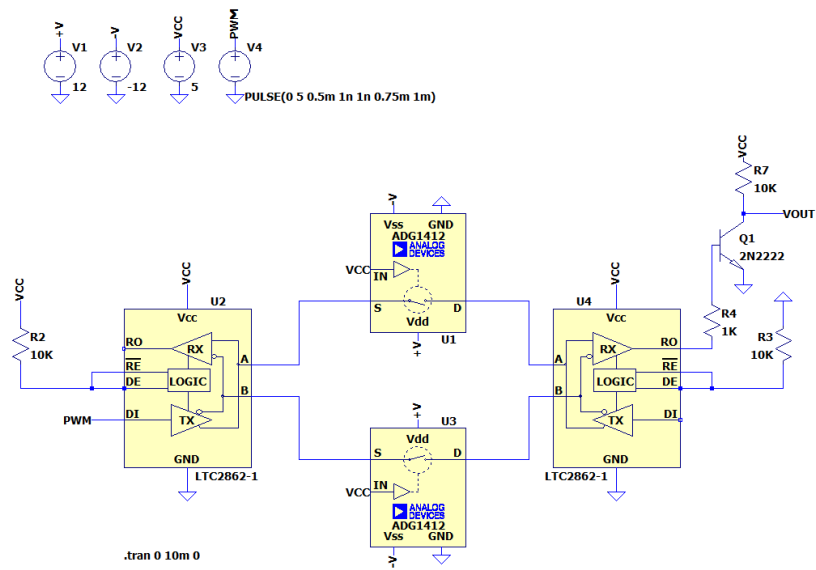


Figura 5.5: Circuito relativo à transmissão do sinal PWM

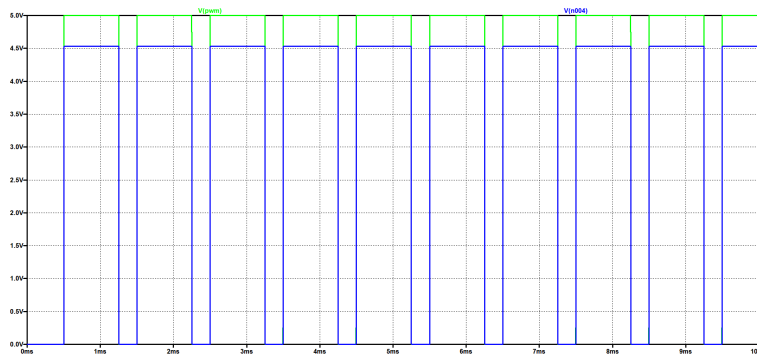


Figura 5.6: Sinal PWM vs Sinal VOUT_A

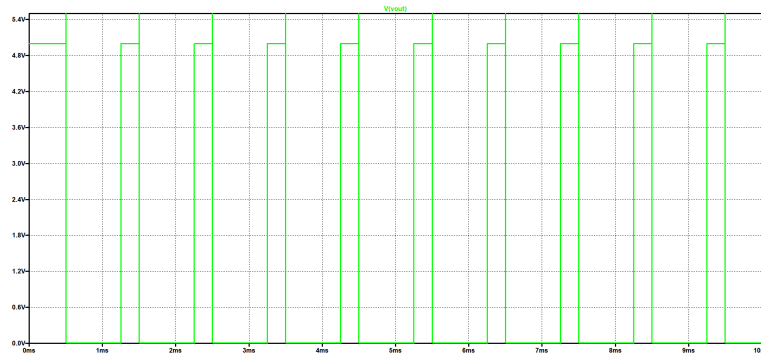


Figura 5.7: Sinal VOUT_B

5.2 Teste de funcionamento do Sistema

O teste relativo ao funcionamento dos módulos periféricos foi efetuado recorrendo a um circuito de teste em *breadboard*, atuando num conjunto de LEDs, de modo a simular o funcionamento do sistema de iluminação. Assim, recorrendo à vista 2D apresentada nos cenários 1, 2 e 3, os módulos periféricos A e B efetuam o controlo individual dos módulos de iluminação superior e inferior, respetivamente. Dado que cada módulo é responsável pelo controlo individual do sistema de iluminação, a sincronização da leitura dos sensores e atuação da iluminação é efetuado recorrendo à rede de comunicação ESP-NOW. Por fim, a intensidade da iluminação da passadeira pode ser controlada recorrendo ao módulo de controlo, que efetua o envio dos dados relativos ao sensor TSL2591 via ESP-NOW para os módulos periféricos A e B.

5.2.1 Cenário 1 - Sentido de Movimento de A para B

O cenário 1 (Fig.5.8) corresponde à travessia de um peão no sentido de movimento de A para B. Assim, de modo a exemplificar o funcionamento deste cenário, apresenta-se o princípio de funcionamento de acordo com as seguintes etapas:

1. Sensor FSR (azul) efetua a sensorização da presença de um peão;
2. Módulo Periférico A atua na parte superior da iluminação, enviando uma mensagem para o módulo periférico B informando da presença de um peão;
3. Módulo Periférico B atua na parte inferior da iluminação;
4. Peão inicia a travessia da passadeira sendo detetado pelo sensor IR (castanho);
5. Sensor IR (castanho) efetua a sensorização da presença de um peão;

6. Módulo Periférico A atua na parte superior da iluminação com um padrão de efeito luminoso com o sentido de 1 para 6, enviando a mensagem para o módulo periférico B informando da travessia de um peão;
7. Módulo Periférico B atua na parte inferior da iluminação com um padrão efeito luminoso com o sentido de 1 para 6.

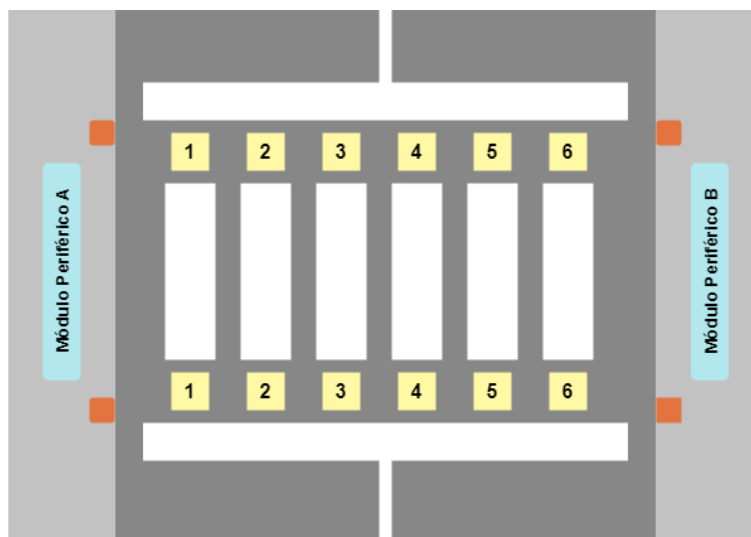


Figura 5.8: Sentido de movimento de A para B

5.2.2 Cenário 2 - Sentido de Movimento de B para A

O cenário 2 (Fig.5.9) corresponde à travessia de um peão no sentido de movimento de B para A. Assim, de modo a exemplificar o funcionamento deste cenário, apresenta-se o princípio de funcionamento de acordo com as seguintes etapas:

1. Sensor FSR (azul) efetua a sensorização da presença de um peão;
2. Módulo Periférico B atua na parte inferior da iluminação, enviando uma mensagem para o módulo periférico A informando da presença de um peão;
3. Módulo Periférico A atua na parte superior da iluminação;
4. Peão inicia a travessia da passadeira sendo detetado pelo sensor IR (castanho);
5. Sensor IR (castanho) efetua a sensorização da presença de um peão;
6. Módulo Periférico B atua na parte inferior da iluminação com um padrão de efeito luminoso com o sentido de 1 para 6, enviando a mensagem para o módulo periférico B informando da travessia de um peão;

- Módulo Periférico A atua na parte superior da iluminação com um padrão efeito luminoso com o sentido de 1 para 6.

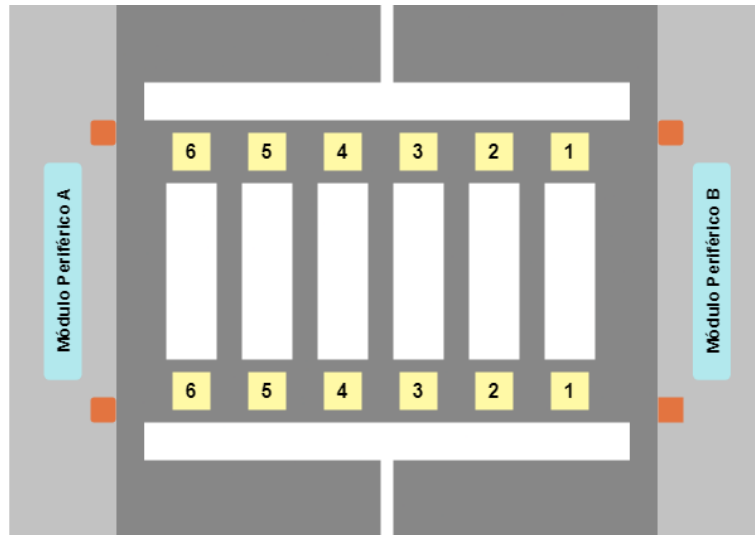


Figura 5.9: Sentido de movimento de B para A

5.2.3 Cenário 3 - Sentido de Movimento em Ambos os Sentidos

O cenário 3 (Fig.5.10) corresponde à travessia de um peão em ambos os sentidos. Este cenário, ocorre quando coexiste o funcionamento dos cenário 1 e 2. Assim, de modo a exemplificar o funcionamento deste cenário, apresenta-se o princípio de funcionamento de acordo com as seguintes etapas:

- Sensor FSR (azul) efetua a sensorização da presença de um peão;
- Módulo Periférico A atua na parte superior da iluminação, enviando uma mensagem para o módulo periférico A informando da presença de um peão;
- Módulo Periférico B atua na parte superior da iluminação;
- Peão inicia a travessia da passareira sendo detetado pelo sensor IR (castanho);
- Sensor IR (castanho) efetua a sensorização da presença de um peão;
- Módulo Periférico A atua na parte superior da iluminação com um padrão de efeito luminoso com o sentido de 1 para 6, enviando a mensagem para o módulo periférico B informando da travessia de um peão;
- Módulo Periférico B atua na parte inferior da iluminação com um padrão efeito luminoso com o sentido de 1 para 6;

8. Sensor FSR e IR efetuam a sensorização de um peão no lado oposto do evento que desencadeou o cenário anterior;
9. Módulo Periférico B envia uma mensagem para o Módulo Periférico A informando da presença de um peão no lado oposto;
10. Módulo Periférico A e B atuam no sistema de iluminação com um padrão de efeito luminoso com o sentido de 1 para 3.

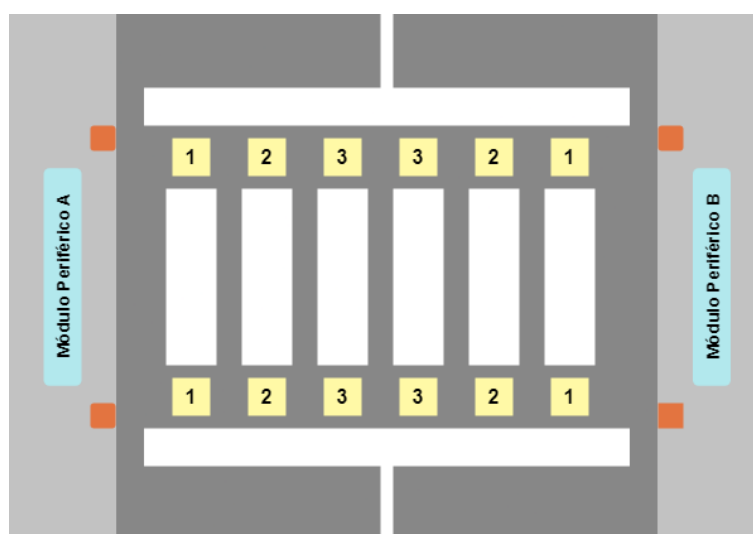


Figura 5.10: Sentido de movimento em ambos os sentidos

5.2.4 Cenário 4 - Detecção de Veículos

O cenário 4 (Fig.5.11) corresponde à detecção de veículos. Assim, de modo a exemplificar o funcionamento deste cenário, apresenta-se o princípio de funcionamento de acordo com as seguintes etapas:

1. Módulo Periférico C ou D efetua a sensorização de um veículo;
2. Módulo Periférico C ou D atua a iluminação de aviso, enviando uma mensagem para os dispositivos periféricos A e B de modo a atuarem a iluminação da passadeira de acordo com o cenário 1.

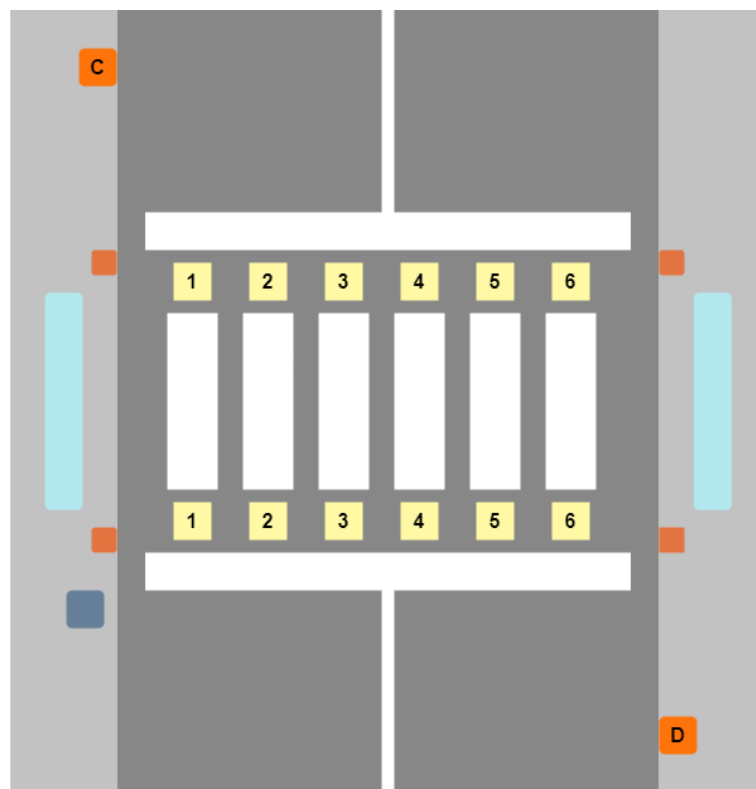


Figura 5.11: Detecção de Veículos

5.3 Teste da Interface de Utilizador

O teste relativo à interface de utilizador envolve o estabelecimento da comunicação entre o módulo de controlo e o *broker* MQTT (Eclipse Mosquitto), recorrendo à rede de comunicação Wi-Fi. Assim, apresenta-se o envio da informação relativa à leitura dos valores de temperatura e humidade do sensor DHT11 presente no módulo de controlo, o envio dos dados relativos à monitorização energética obtidos recorrendo à leitura do sensor INA219, bem como o envio de dados relacionados com a contagem de peões e veículos obtidos através dos dispositivos periféricos.

5.3.1 Painel *Dashboard*

O painel *Dashboard* apresenta uma interface com a informação relativa ao sensor de temperatura DHT11 presente nos módulos de controlo e periféricos, bem como a contagem do número de peões e veículos. Tendo em conta que não foi possível implementar o sistema, apresenta-se os dados que foram possíveis obter no módulo de controlo. Deste modo, apresenta-se, na figura 5.13, o envio dos

dados relativos à temperatura e humidade no módulo de controlo, durante um período de cerca de 2 horas.

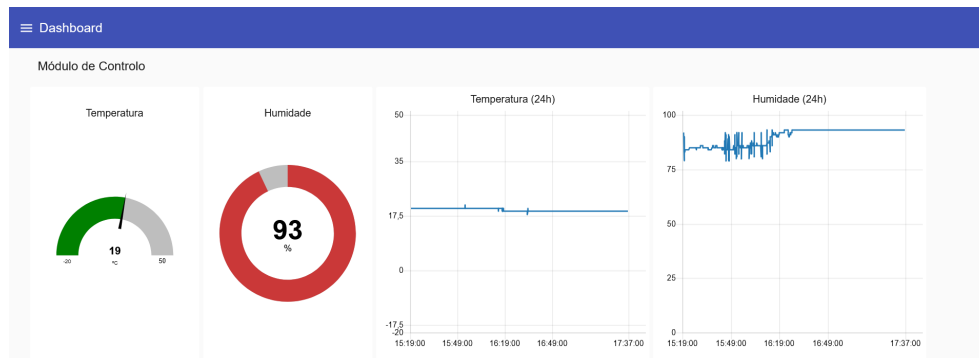


Figura 5.12: Painel *Dashboard*

5.3.2 Painel de Energia

O Painel de Energia apresenta uma interface com a informação relativa aos valores de tensão, corrente e potência do painel fotovoltaico e bateria. Tendo em conta que não foi possível implementar o sistema, apresenta-se os dados que foram possíveis obter através da utilização de uma fonte de alimentação acoplada a uma resistência de potência com valor nominal de $22\Omega/17W$, efetuando a variação da tensão de alimentação entre os valores de 0 a 16 V.

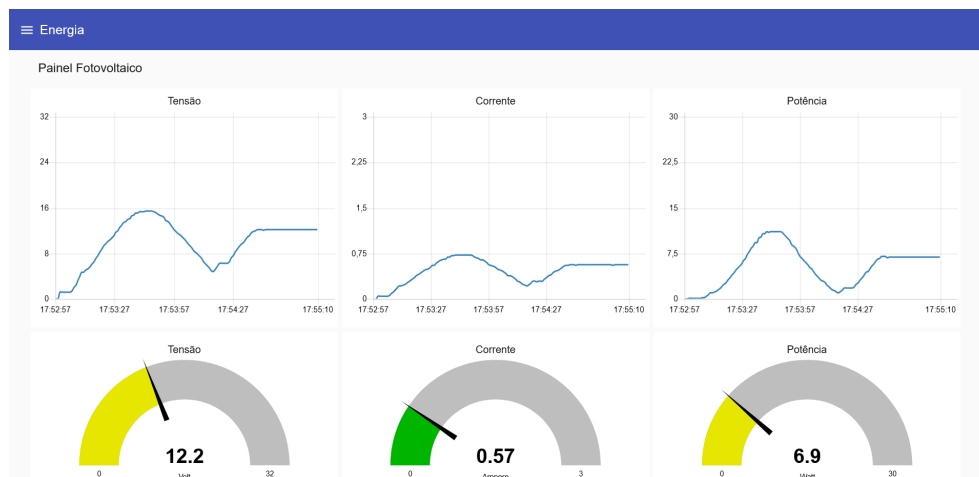
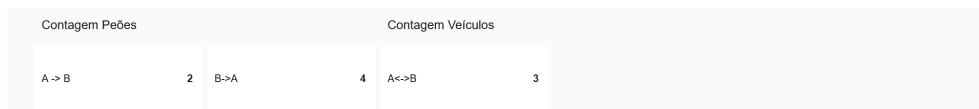


Figura 5.13: Painel de Energia

5.3.3 Contagem do número de Peões e Veículos

A contagem do número de peões e veículos é efetuada sempre que os cenários anteriormente mencionados se verifiquem, sendo que o dispositivo periférico associado efetua uma mensagem via ESP-NOW para o módulo de controlo, sendo esta redirecionada via MQTT para a interface gráfica de utilizador, incrementando um contador que possibilita apresentar o número total de peões e veículos detetados pelos sensores. Na figura 5.14 apresenta-se o painel de contagem do número de peões e veículos.



The image shows a dashboard with two main sections: 'Contagem Peões' and 'Contagem Veículos'. The 'Contagem Peões' section contains two columns: 'A->B' with a value of 2, and 'B->A' with a value of 4. The 'Contagem Veículos' section contains one column: 'A<->B' with a value of 3. The dashboard has a light gray background and a vertical scrollbar on the right side.

Contagem Peões		Contagem Veículos	
A->B	2	B->A	4
		A<->B	3

Figura 5.14: Painel de Contagem do número de peões e veículos

Capítulo 6

Conclusões

O trabalho desenvolvido envolve um sistema que possibilite efetuar o controlo de uma passadeira, recorrendo a um conjunto de mecanismos de sensorização.

O sistema apresentando pode ser dividido essencialmente em duas redes de controlo: uma rede sem fios a nível local, tendo por base a tecnologia ESP-NOW, que efetua a gestão da informação relativa à sensorização do ambiente em redor da passadeira, nomeadamente a presença de peões e veículos e a rede de comunicação Wi-Fi, que possibilita o envio de informação para um *broker* MQTT, sendo apresentada numa interface gráfica de utilizador.

O módulo de controlo é o dispositivo central da solução, uma vez que efetua a gestão da informação da rede ESP-NOW e Wi-Fi. Deste modo, é constituído por um sensor de luminosidade que possibilita a medição da intensidade luminosa local e assim, efetuar o controlo da intensidade do sistema de iluminação de modo a tornar o sistema mais eficiente. Efetua ainda a recolha de um conjunto de dados relativos aos dispositivos periféricos, nomeadamente a contagem do número de veículos e peões, bem como a medição dos valores de temperatura e humidade dos módulos, enviando esta informação para uma interface gráfica de utilizador.

Os módulos periféricos estabelecem uma comunicação sem fios local tendo por base a tecnologia ESP-NOW, efetuando a leitura e processamento de dados dos sensores relativos à sensorização de peões e veículos, atuação do sistema de iluminação de acordo com o sentido de movimento dos peões com diferentes níveis de intensidade luminosa e envio de informação para o módulo de controlo.

O sistema de gestão energético apresenta a possibilidade de alimentação de todo o sistema tendo por base uma fonte de energia renovável, bem como o armazenamento da energia recolhida recorrendo a baterias; além disso, é possível efetuar a monitorização da produção e consumo energético do sistema através do módulo de controlo.

6.1 Trabalho Futuro

A nível da implementação, tendo em conta que não foi possível implementar os sensores relativos à deteção de peões e veículos, este seria um ponto a considerar para a validação da solução.

A nível de comunicação, a implementação de uma rede de comunicação de baixa potência e longo alcance seria um aspeto a considerar, uma vez que o local de implementação da passadeira poderá não apresentar acesso a uma rede Wi-Fi.

Por fim, relativamente ao sistema de gestão energético, a solução apresentada encontra-se dimensionada para uma solução geral de implementação deste sistema, não envolvendo a análise do consumo energético dos diferentes módulos e sistema de iluminação. Deste modo, este seria um ponto a considerar para um dimensionamento mais ajustado da solução.

Referências Bibliográficas

- [1] ClimateLaunchpad, “*Pavnext, promoting safer, smarter and more sustainable cities.*” <https://climatelaunchpad.org/finalists/pavnext/>, Último Acesso: 13 outubro, 2022. [cited on p. v, 2]
- [2] United Nations, “World Urbanization Prospects - The 2018 Revision.” <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>, Último Acesso: 18 março, 2022. [cited on p. v, 5, 6]
- [3] A. Gharaibeh, M. A. Salahuddin, S. J. Hussini, A. Khreishah, I. Khalil, M. Guizani, and A. Al-Fuqaha, “Smart cities: A survey on data management, security, and enabling technologies,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2456–2501, 2017. [cited on p. v, 6]
- [4] N. Hossein Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B. Zakeri, “Internet of things (iot) and the energy sector,” *Energies*, vol. 13, p. 494, 01 2020. [cited on p. v, 7]
- [5] L. Frenzel, *Handbook of serial communications interfaces: a comprehensive compendium of serial digital input/output (I/O) standards*. Newnes, 2015. [cited on p. v, ix, 9, 10, 13, 15, 18, 19]
- [6] Analog Devices, “UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.” <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 11]
- [7] Texas Instruments, “The RS-485 Design Guide.” <https://www.ti.com/lit/an/s11a272d/s11a272d.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 12, 13]

- [8] Analog Devices, “Controller Area Network (CAN) Implementation Guide.” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-1123.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 14, 15]
- [9] Philips Semiconductors, “The I2 C-bus and how to use it (including specifications).” https://www.i2c-bus.org/fileadmin/ftp/i2c_bus_specification_1995.pdf, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 16]
- [10] Analog Devices, “I2C Primer: What is I2C? (Part 1).” <https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 16, 17]
- [11] Analog Devices, “Introduction to SPI Interface.” <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 17, 18]
- [12] K. Gomez Chavez, R. Riggio, T. Rasheed, and F. Granelli, “Analysing the energy consumption behaviour of wifi networks,” pp. 98–104, 09 2011. [cited on p. v, 21]
- [13] Sigfox, “What is Sigfox?.” <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story>, Último Acesso: 22 maio, 2022. [cited on p. v, 23, 24]
- [14] Panasonic Industry, “Photoelectric Sensors.” https://www3.panasonic.biz/ac/ae/service/tech_support/fasys/tech_guide/data/photoelectric_e.pdf, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. v, 27]
- [15] Z. Qiu, Y. Lu, and Z. Qiu, “Review of ultrasonic ranging methods and their current challenges,” *Micromachines*, vol. 13, p. 520, 03 2022. [cited on p. v, 28, 29]
- [16] R. C. B. Rego and R. Semente, “Presence sensor for people detection and reduction of pedestrian waiting time in traffic light,” vol. 1, 10 2018. [cited on p. v, 35]
- [17] Espressif Systems, “ESP32 Series Datasheet.” https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. vi, 45]
- [18] Interlink Electronics, “FSR Integration Guide Evaluation Parts Catalog With Suggested Electrical Interfaces.” <https://www.sparkfun.com/>

- [datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf](#), Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. vi, 46]
- [19] Autonics, “Photoelectric Sensor Guide.” www.autonics.com/common/download/441631, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. vi, 49]
- [20] ams OSRAM, “TSL2591 Light-to-Digital Converter.” https://ams.com/documents/20143/36005/TSL2591_DS000338_6-00.pdf, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. vi, 51, 66]
- [21] Linear Technology, “High Voltage, High Current Buck-Boost Battery Charge Controller with Maximum Power Point Tracking (MPPT).” <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/8490fa.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. vi, 74, 75, 76]
- [22] Texas Instruments, “INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface.” <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. vi, 76, 77]
- [23] A. Bahashwan, M. Anbar, N. Abdullah, S. M. Hanshi, and T. Al-Hadhrami, *Review on Common IoT Communication Technologies for Both Long-Range Network (LPWAN) and Short-Range Network*, p. 341 353. 10 2020. [cited on p. ix, 21, 22, 23, 25]
- [24] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment,” vol. 5, pp. 1–7, 03 2019. [cited on p. ix, 23, 24, 25]
- [25] M. Prauzek, J. Konecny, M. Borová, K. Janošová, J. Hlavica, and P. Musilek, “Energy harvesting sources, storage devices and system topologies for environmental wireless sensor networks: A review,” *Sensors*, vol. 18, p. 2446, 07 2018. [cited on p. ix, 30, 31, 32]
- [26] P. Nimac, A. Krpič, B. Batagelj, and A. Gams, “Pedestrian traffic light control with crosswalk fmcw radar and group tracking algorithm,” *Sensors*, vol. 22, no. 5, 2022. [cited on p. ix, 36, 37]
- [27] UPTEC, “Pavnext.” <https://uptec.up.pt/pt-pt/empresas/pavnext/>, Último Acesso: 13 outubro, 2022. [cited on p. 1]
- [28] Pavnext, “O que é o NEXT-Road?.” <https://www.pavnext.com/o-que-fazemos/?lang=pt-pt>, Último Acesso: 13 outubro, 2022. [cited on p. 1]

- [29] Organização Mundial de Saúde, “Road traffic injuries.” <https://www.who.int/health-topics/road-safety>, Último Acesso: 13 outubro, 2022. [cited on p. 2]
- [30] Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, “RELATÓRIO JUNHO 2022.” <http://www.ansr.pt/Estatisticas/RelatoriosDeSinistralidade/Documents/2022/Relat%C3%B3rio%20Sinistralidade%20Junho%202022.pdf>, Último Acesso: 13 outubro, 2022. [cited on p. 2]
- [31] United Nations, “Cities: a 'cause of and solution to' climate change.” <https://news.un.org/en/story/2019/09/1046662>, Último Acesso: 18 março, 2022. [cited on p. 5]
- [32] S. Pellicer, G. Santa, A. L. Bleda, R. Maestre, A. J. Jara, and A. G. Skarmeta, “A global perspective of smart cities: A survey,” in *2013 Seventh International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, pp. 439–444, 2013. [cited on p. 5]
- [33] S. Kumar, P. Tiwari, and M. Zymbler, “Internet of things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review,” *Journal of Big data*, vol. 6, no. 1, pp. 1–21, 2019. [cited on p. 7]
- [34] S. Madakam, V. Lake, V. Lake, V. Lake, *et al.*, “Internet of things (iot): A literature review,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, no. 05, p. 164, 2015. [cited on p. 7]
- [35] V. Kafle, Y. Fukushima, and H. Harai, “Internet of things standardization in itu and prospective networking technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 43–49, 09 2016. [cited on p. 7]
- [36] Texas Instruments, “Implementing 1-Wire Enumeration for TMP1826 With TM4C129x Microcontrollers.” <https://www.ti.com/lit/an/spma057d/spma057d.pdf>, Último Acesso: 20 março, 2022. [cited on p. 8]
- [37] T. Nolte, H. Hansson, and L. Lo Bello, “Automotive communications-past, current and future,” 01 2005. [cited on p. 9]
- [38] Microchip, “LIN Overview.” <https://www.microchipdeveloper.com/lin:overview>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 9]
- [39] Texas Instruments, “LIN Protocol and Physical Layer Requirements.” <https://www.ti.com/lit/an/s11a383a/s11a383a.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 9]
- [40] Microchip, “DMX512A.” <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00001659A.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 10]

- [41] A. Kaur and A. Kaur, “An approach for designing a universal asynchronous receiver transmitter (uart),” 2012. [cited on p. 11]
- [42] A. K. Gupta, A. Raman, N. Kumar, and R. Ranjan, “Design and implementation of high-speed universal asynchronous receiver and transmitter (uart),” in *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 295–300, 2020. [cited on p. 11]
- [43] Analog Devices, “RS-485/RS-422 Circuit Implementation Guide.” <https://atnel.pl/download/poradniki/rs485/AN-960.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 12]
- [44] Raveon, “Serial Communications RS232, RS485, RS422.” [https://www.raveon.com/ApplicationNotes/AN236\(SerialComm\).pdf](https://www.raveon.com/ApplicationNotes/AN236(SerialComm).pdf), Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 12]
- [45] Texas Instruments, “Introduction to the Controller Area Network (CAN).” <https://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 14]
- [46] W. Voss, *A comprehensible guide to controller area network*. Copperhill Media, 2008. [cited on p. 14]
- [47] Texas Instruments, “A System Evaluation of CAN Transceivers.” <https://www.ti.com/lit/an/s11a109a/s11a109a.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 14]
- [48] Texas Instruments, “Understanding the I2C Bus.” <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 16]
- [49] Analog Devices, “I2C Communication Protocol: Understanding I2C Primer, PMBus, and SMBus.” <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/i2c-communication-protocol-understanding-i2c-primer-pmbus-and-smbus.html>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 16]
- [50] P. Henry and H. Luo, “Wifi: what’s next?,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 12, pp. 66–72, 2002. [cited on p. 19, 20]
- [51] Wi-Fi Alliance. <https://www.wi-fi.org/>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 19]
- [52] A. Sari and M. Karay, “Comparative analysis of wireless security protocols: Wep vs wpa,” *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 8, pp. 483–491, 12 2015. [cited on p. 20]

- [53] IBM, “Connecting all the things in the Internet of Things.” <https://developer.ibm.com/articles/iot-lp101-connectivity-network-protocols/>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 20]
- [54] Zigbee, “The Full-Stack Solution Interlacing All Your Smart Devices.” <https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>, Último Acesso: 24 março, 2022. [cited on p. 21]
- [55] I. Amin and A. Saeed, “5.10 wireless technologies in energy management,” in *Comprehensive Energy Systems* (I. Dincer, ed.), pp. 389–422, Oxford: Elsevier, 2018. [cited on p. 21]
- [56] Z-Wave. <https://www.z-wave.com/>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 22]
- [57] LoRa Alliance, “What is LoRaWAN.” https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 23]
- [58] F. Xu, X. Li, Y. Shi, L. Li, W. Wang, L. He, and R. Liu, “Recent developments for flexible pressure sensors: A review,” *Micromachines*, vol. 9, no. 11, 2018. [cited on p. 26]
- [59] G. Zhou, L. Huang, W. Li, and Z. Zhu, “Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: a survey,” *Journal of Sensors*, vol. 2014, 2014. [cited on p. 30]
- [60] E. Dance, H. Walker, L. Sargent, G. Hilliard, and P. Stinson, “Smart crosswalk dynamic lighting system design document,” 2015. [cited on p. 33]
- [61] J. M. Lozano Domínguez, F. Al-Tam, T. d. J. M. Sanguino, and N. Correia, “Vehicle detection system for smart crosswalks using sensors and machine learning,” in *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, pp. 984–991, 2021. [cited on p. 34]
- [62] M. Pogatsnik, D. Fischer, L. Nagy, and S. Dora, “Autonomous pedestrian crossing in smart city environment,” in *2020 IEEE 24th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, pp. 37–42, 2020. [cited on p. 38]
- [63] LED Solutions, “Smart Crosswalk.” <https://ledsolutions.kz/en/smart-crosswalk/>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 39]
- [64] Bercman Technologies, “Smart Pedestrian Crosswalk.” <https://www.bercman.com/products/smart-pedestrian-crosswalk/>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 40]

- [65] Euroasfalt, “SmartPass.” <https://euroasfalt.pl/en/products/smartpass-2/>, Último Acesso: 24 maio, 2022. [cited on p. 40]
- [66] Microchip, “ATmega328PB.” <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001906A.pdf>, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [67] LCSC Electronics, “Microchip Tech ATMEGA328PB-AU.” https://www.lcsc.com/product-detail/MICROCHIP_Microchip-Tech-ATMEGA328PB-AU_C132230.html, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [68] Microchip, “ATtiny24A/44A/84A.” <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATtiny24A-44A-84A-DataSheet-DS40002269A.pdf>, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [69] LCSC Electronics, “Microchip Tech ATTINY84A-PU.” https://www.lcsc.com/product-detail/MICROCHIP_Microchip-Tech-ATTINY84A-PU_C145560.html, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [70] STMicroelectronics, “STM8L052C6.” https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811151538_STMicroelectronics-STM8L052C6T6_C66710.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [71] LCSC Electronics, “STMicroelectronics STM8L052C6T6.” https://www.lcsc.com/product-detail/ST-Microelectronics_STMicroelectronics-STM8L052C6T6_C66710.html, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [72] STMicroelectronics, “STM8S903K3 STM8S903F3.” https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1809301517_STMicroelectronics-STM8S903K3T6CTR_C8257.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [73] LCSC Electronics, “STMicroelectronics STM8S903K3T6CTR.” https://www.lcsc.com/product-detail/ST-Microelectronics_STMicroelectronics-STM8S903K3T6CTR_C8257.html, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [74] STMicroelectronics, “STM32G030x6/x8.” https://datasheet.lcsc.com/lcsc/2009240934_STMicroelectronics-STM32G030F6P6_C724040.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [75] LCSC Electronics, “STMicroelectronics STM32G030F6P6.” https://www.lcsc.com/product-detail/ST-Microelectronics_

- STMicroelectronics-STM32G030F6P6_C724040.html, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [76] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32E ESP32-WROOM-32UE Datasheet.” https://pt.mouser.com/datasheet/2/891/esp32_wroom_32e_esp32_wroom_32ue_datasheet_en-1855879.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [77] Espressif Systems, “ESP32 Technical Reference Manual.” https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [78] Mouser Electronics, “ESP32-WROOM-32E-N16.” <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-WROOM-32E-N16?qs=Li%252BoUPsLEnsC4cA%252BUYB2Bw%3D%3D>, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [79] Espressif Systems, “ESP32-C3-MINI-1 ESP32-C3-MINI-1U Datasheet.” https://pt.mouser.com/datasheet/2/891/esp32_c3_mini_1_datasheet_en-2578671.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [80] Espressif Systems, “ESP32-C3 Technical Reference Manual.” https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_technical_reference_manual_en.pdf, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [81] Mouser Electronics, “ESP32-C3-MINI-1-H4.” <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-C3-MINI-1-H4?qs=stq0d1AaK78JkwNX13Q9hQ%3D%3D>, Último Acesso: 15 junho, 2022. [cited on p. 44]
- [82] Ohmite, “Integration Guide Force Sensing Resistor.” https://www.mouser.com/pdfdocs/Ohmite-FSR-Integration-Guide-V1-0_11-01-18.pdf, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 46]
- [83] Vishay Intertechnology, Inc., “Optoelectronics Sensors.” https://www.vishay.com/docs/49670/_p10366.pdf, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 49]
- [84] Texas Instruments, “OPT3001 Ambient Light Sensor (ALS).” <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 51]
- [85] ROHM Semiconductor, “Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC BH1750FVI.” <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 51]

- [86] Vishay Intertechnology, Inc., “High Accuracy Ambient Light Sensor With I2C Interface VEML7700.” <https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 51]
- [87] Espressif Systems, “ESP-NOW.” https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 51]
- [88] Espressif Systems, “Wi-Fi.” https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_wifi.html, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 53]
- [89] IBM, “Getting to know MQTT.” <https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 53]
- [90] HiveMQ, “MQTT Essentials.” <https://www.hivemq.com/mqtt-essentials/>, Último Acesso: 10 outubro, 2021. [cited on p. 53]
- [91] Espressif Systems, “ESP-MQTT.” <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/protocols/mqtt.html>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 54]
- [92] Espressif Systems, “ESP-IDF Programming Guide.” <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 55]
- [93] Eclipse Foundation, “Eclipse Mosquitto An open source MQTT broker.” <https://mosquitto.org/>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 56]
- [94] Texas Instruments, “xx555 Precision Timers.” <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 63]
- [95] Vishay Intertechnology, Inc., “High Power Infrared Emitting Diode, 940 nm, GaAlAs, MQW TSAL4400.” <https://www.vishay.com/docs/81006/tsal4400.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 63]
- [96] Vishay Intertechnology, Inc., “IR Receiver Modules for Remote Control Systems TSOP38238.” <https://www.vishay.com/docs/82491/tsop382.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 63]
- [97] ON Semiconductor, “P2N2222A Amplifier Transistors NPN Silicon.” <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p2n2222a-d.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 63]

- [98] Maxim Integrated, “MAX481/MAX483/MAX485/MAX487–MAX491/MAX1487 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers.” <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1487-MAX491.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 64]
- [99] Maxim Integrated, “MAX14759/MAX14761/MAX14763 Above-and Below-the-Rails Low On-Resistance Analog Switches.” <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX14759-MAX14763.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 64]
- [100] Texas Instruments, “CD4066B CMOS Quad Bilateral Switch.” <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4066b.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 64]
- [101] FreeRTOS, “Real-time operating system for microcontrollers.” <https://www.freertos.org/>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 66]
- [102] OSEPP Electronics, “DHT11 Humidity Temperature Sensor.” <https://eu.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 67]
- [103] Cellevia Power, “CL-SM60P High Efficiency, High Quality PV Module.” <https://www.tme.eu/Document/588851629905618b59bce11c3817b277/CL-SM60P.pdf>, Último Acesso: 10 outubro, 2022. [cited on p. 74]