

Estação Meteorológica

PEDRO FILIPE GONÇALVES PEREIRA
novembro de 2023

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Estação Meteorológica

Pedro Filipe Gonçalves Pereira

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro, 2023

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas.

Candidato: Pedro Filipe Gonçalves Pereira, N° 1170413,
1170413@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Lino Manuel Baptista Figueiredo, lbf@isep.ipp.pt



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Novembro, 2023

Agradecimentos

Esta dissertação revelou ser um grande desafio como a última etapa deste ciclo de estudos, pelo que o desenvolvimento da mesma não seria possível sem o apoio de várias pessoas.

Assim, começo por agradecer ao professor Lino Figueiredo pela orientação e disponibilidade no desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã pelo apoio incondicional, suporte e carinho que me deram não só nesta etapa final, mas em toda a minha vida.

Por último, agradeço aos meus amigos pelos grandes e inesquecíveis momentos partilhados ao longo do meu percurso académico.

Resumo

A recolha e análise dos parâmetros atmosféricos é de elevada importância, uma vez que fornece informações cruciais sobre as condições da atmosfera terrestre em diferentes localizações e momentos. As principais razões para a aquisição destes parâmetros prendem-se com a previsão meteorológica em geral, com estudos climáticos, com a monitorização de eventos extremos, entre outros. Neste âmbito, surge o desenvolvimento deste projeto que visa a criação de um sistema de recolha, tratamento e análise dos mais diversos parâmetros atmosféricos ou, por outras palavras, de uma estação meteorológica. A solução proposta baseia-se no conceito da *Internet of Things* (IoT) no sentido da implementação de um sistema inteligente com a interligação de diversos sensores e microcontroladores através de vários protocolos de comunicação.

O sistema desenvolvido pode ser essencialmente dividido em três grupos distintos: os módulos secundários, o módulo principal e o servidor. Os módulos secundários são compostos pelos diferentes sensores responsáveis pela medição dos parâmetros atmosféricos e por microcontroladores. Estes módulos secundários estabelecem uma comunicação *wireless* com o módulo principal através da rede de comunicação LoRa. O módulo principal funciona como *gateway* e envia os dados para um servidor, onde são processados e enviados para um *website*.

A solução desenvolvida é posteriormente validada através da recolha e análise dos valores lidos pelos sensores e da sua comparação com registos oficiais dos mesmos parâmetros.

Palavras-Chave: parâmetros atmosféricos, estação meteorológica, IoT, sensores, *gateway*, LoRa.

Abstract

The collection and analysis of atmospheric parameters is of great importance, as it provides crucial information about the conditions of the Earth's atmosphere at different times and locations. The main reasons for acquiring these parameters are related to weather forecasting in general, climate studies, monitoring of extreme events, among others. In this context, the development of this project arises, which aims to create a system for collecting, processing and analyzing the most diverse atmospheric parameters or, in other words, a meteorological station. The proposed solution is based on the IoT concept in terms of implementing an intelligent system with the interconnection of several sensors and microcontrollers through various communication protocols.

The developed system can essentially be divided into three distinct groups: the secondary modules, the main module and the server. The secondary modules are made up of different sensors responsible for measuring atmospheric parameters and of microcontrollers. These secondary modules establish a wireless communication with the main module through the LoRa communication network. The main module works as gateway and sends data to a server, where it is processed and sent to a website.

The developed solution is validated by collecting and analyzing the values read by the sensors and comparing them with the official records of the same parameters.

Keywords: atmospheric parameters, meteorological station, IoT, sensors, gateway, LoRa.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
Lista de Símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Plano de Trabalho	3
1.4 Organização da Dissertação	3
1.5 Resumo do Capítulo 1	4
2 Estado da Arte	5
2.1 Internet of Things	5
2.1.1 Arquitetura Geral de Sistemas IoT	7
2.1.2 Aplicações da IoT	8
2.1.3 Desafios Atuais da IoT	9
2.2 Cidade Inteligentes	10
2.2.1 Componentes de uma Cidade Inteligente	11
2.2.2 Desafios das Cidades Inteligentes	12
2.3 Estações Meteorológicas	12
2.3.1 O que são Estações Meteorológicas	13
2.3.2 Tipos de Estações Meteorológicas	13
2.3.3 Exemplos de Estações Meteorológicas	17
2.3.4 Estações Meteorológicas em Portugal	18
2.3.5 Parâmetros Meteorológicos	19
2.4 Tecnologias de Comunicação	23
2.4.1 WiFi	24
2.4.2 ZigBee	24
2.4.3 LoRa	24
2.4.4 Sigfox	25

2.4.5	LTE-M	26
2.4.6	NB-IoT	26
2.4.7	MQTT	26
2.4.8	CoAP	27
2.4.9	XMPP	27
2.4.10	AMQP	28
2.4.11	HTTP	28
2.4.12	Comparação das Diferentes Tecnologias	29
2.5	Casos de Estudo	30
2.5.1	Protótipo de uma Estação meteorológica com Recurso a LoRa	30
2.5.2	Estação meteorológica <i>Wireles</i> Baseada em Arduino	31
2.6	Resumo do Capítulo 2	33
3	Arquitetura do Sistema	35
3.1	Arquitetura dos Módulos Secundários	36
3.2	Arquitetura do Módulo Principal	46
3.3	Análise de Custos do Sistema	49
3.4	Resumo do Capítulo 3	50
4	Implementação do Sistema	51
4.1	Descrição do <i>Hardware</i> dos Módulos Secundários	51
4.2	Descrição do <i>Software</i> dos Módulos Secundários	57
4.3	Descrição do <i>Hardware</i> da <i>Gateway</i>	64
4.4	Descrição do <i>Software</i> da <i>Gateway</i>	65
4.5	Resumo do Capítulo 4	68
5	Implmenetação do Servidor e da Interface de Utilizador	69
5.1	Implementação do Servidor	69
5.2	Implementação da Interface de Utilizador	74
5.3	Resumo do Capítulo 5	75
6	Testes e Resultados	77
6.1	Análise dos Dados Recolhidos	77
6.2	Análise dos Resultados Obtidos	84
6.3	Análise e Testes da Comunicação LoRa	86
6.4	Comunicação MQTT	90
6.5	Resumo do Capítulo 6	91
7	Conclusões	93
7.1	Trabalho Futuro	94
	Referências	95

Anexo A	Esquema elétrico geral dos módulos secundários	103
Anexo B	PCB dos módulos secundários	105

Lista de Figuras

1.1	Calendarização do projeto.	3
2.1	Exemplo de representação gráfica da Internet of Things [4].	6
2.2	Arquitetura geral de um sistema IoT [6].	8
2.3	Componentes de uma Cidade Inteligente [9].	10
2.4	Estação meteorológica [19].	13
2.5	Estação Meteorológica num navio [21].	14
2.6	Estação Meteorológica numa boia amarrada [22].	14
2.7	Estação Meteorológica numa torre [23].	15
2.8	Balão meteorológico [25].	16
2.9	Satélite meteorológico norte americano [26].	17
2.10	Observatório de Mauna Loa [28].	17
2.11	Observatório meteorológico de Hohenpeissenberg [30].	18
2.12	Estação meteorológica do Pico do Areeiro, Madeira [32].	19
2.13	Variação da tensão em função da temperatura, nos diferentes tipos de TC [34].	20
2.14	Barómetro de mercúrio [36].	21
2.15	Pluviómetro de balde basculante [38].	23
2.16	Cobertura LoRa no Porto [43].	25
2.17	Arquitetura do MQTT [46].	27
2.18	Arquitetura do CoAP [46].	27
2.19	Arquitetura do AMQP [46].	28
2.20	Arquitetura do sistema do primeiro caso de estudo [49].	31
2.21	Arquitetura do sistema do segundo caso de estudo [50].	32
2.22	Variação da temperatura em função do tempo [50].	32
2.23	Interface gráfica desenvolvida no segundo caso de estudo [50].	33
3.1	Arquitetura geral do sistema.	36
3.2	Arquitetura do primeiro módulo secundário.	36
3.3	Arquitetura do segundo módulo secundário.	40
3.4	Arquitetura do terceiro módulo secundário.	42
3.5	Anemómetro utilizado [70].	42
3.6	Curva da tensão gerada em função da velocidade do vento [70].	43

3.7	Pluviómetro WH-SP-RG [71].	44
3.8	Arquitetura do módulo principal.	46
3.9	Bateria de lítio [80].	49
4.1	PCB dos módulos secundários.	52
4.2	Circuito de alimentação dos PCB.	52
4.3	<i>Pin mapping</i> do regulador de tensão AMS1117 [81].	53
4.4	<i>Pin mapping</i> do módulo LoRa RFM95W [82].	53
4.5	Protocolo de comunicação SPI [83].	53
4.6	Esquema elétrico do primeiro módulo secundário.	55
4.7	Esquema elétrico do segundo módulo secundário.	56
4.8	Esquema elétrico do terceiro módulo secundário.	57
4.9	Composição de uma trama enviada pelos módulos secundários.	58
4.10	Processo de transmissão de dados no módulo RFM95W (adaptado de [78]).	59
4.11	Processo de receção de dados no módulo RFM95W (adaptado de [78]).	60
4.12	Fluxograma do código do primeiro módulo secundário.	61
4.13	Fluxograma do código do segundo módulo secundário.	62
4.14	Fluxograma do código do terceiro módulo secundário.	63
4.15	Linearização do sensor do vento.	64
4.16	Esquema elétrico do módulo principal.	65
4.17	Implementação do protocolo MQTT no projeto.	66
4.18	Fluxograma da função responsável pelas inicializações.	66
4.19	Fluxograma da função responsável pelo envio do identificador.	67
4.20	Fluxograma da função de leitura da resposta dos módulos secundários.	68
5.1	Tabelas da base de dados do sistema.	70
5.2	Fluxograma da função principal do programa.	71
5.3	Fluxograma da função de tratamento de dados.	72
5.4	Fluxograma da função de atualização da base de dados.	73
5.5	<i>Views</i> que compõem o <i>website</i>	74
5.6	Esquema de encaminhamento do <i>website</i>	75
6.1	Página principal do <i>website</i>	78
6.2	Valores de temperatura recolhidos.	78
6.3	Valores de humidade recolhidos.	79
6.4	Valores de pressão atmosférica recolhidos.	80
6.5	Valores da intensidade solar recolhidos.	81
6.6	Valores da radiação UV recolhidos.	81
6.7	Valores da velocidade do vento recolhidos.	82
6.8	Valores da precipitação recolhidos.	83

6.9	Estatísticas gerais dos parâmetros recolhidos.	83
6.10	Previsão oficial de alguns parâmetros recolhidos pela estação.	84
6.11	Comparação dos valores de temperatura da estação e da API.	85
6.12	Comparação dos valores de pressão atmosférica da estação e da API.	85
6.13	Comparação dos valores de humidade da estação e da API.	86
6.14	Comparação dos valores de velocidade do vento da estação e da API.	86
6.15	Registo dos parâmetros da comunicação do primeiro módulo secundário.	87
6.16	Registo dos parâmetros da comunicação do segundo módulo secundário.	88
6.17	Registo dos parâmetros da comunicação do terceiro módulo secundário.	88
6.18	Estatísticas da comunicação dos módulos secundários.	89
6.19	Comunicação MQTT entre o servidor e o módulo principal e atualização da base de dados.	90
6.20	Exemplo de uma tabela da base de dados.	91

Lista de Tabelas

2.1	Limitações apresentadas pelos diferentes componentes [16].	12
2.2	Vantagens e desvantagens de satélites meteorológicos [20].	16
2.3	Comparação dos diferentes protocolos de comunicação entre sensores e <i>gateway</i> [40].	29
2.4	Comparação dos diferentes protocolos de comunicação entre a <i>gateway</i> e a <i>cloud</i> [46][48].	30
2.5	Resultados obtidos no primeiro caso de estudo [49].	31
3.1	Características de alguns sensores de temperatura [51][52].	37
3.2	Preço dos sensores de temperatura referidos [53][54][55][56][57].	37
3.3	Características dos sensores de pressão atmosférica considerados [58][59][60].	37
3.4	Preço dos sensores de pressão referidos [53][54][55][56][57].	38
3.5	Características dos sensores de temperatura e humidade atmosférica considerados [61][62][63][64].	39
3.6	Preço dos sensores de temperatura e humidade selecionados [53][54][55][56][57].	39
3.7	Algumas características dos sensores de radiação UV considerados [65][66].	40
3.8	Preço dos sensores de radiação UV considerados [53][54][55][56][57].	40
3.9	Características principais dos sensores de intensidade luminosa [67][68][69].	41
3.10	Preço dos sensores de intensidade luminosa analisados [53][54][55][56][57].	41
3.11	Informações do anemómetro fornecidas pelo fabricante [70].	43
3.12	Características dos microcontroladores considerados [72][73][74].	45
3.13	Preço dos microcontroladores analisados para os módulos secundários [53][54][55][56][57].	45
3.14	Características dos microcontroladores analisados para o módulo principal [75][76][77].	46
3.15	Preço dos microcontroladores analisados para o módulo principal [53][54][55][56][57].	47
3.16	Características dos módulos LoRa considerados [78][79].	48
3.17	Preço dos módulos LoRa considerados [53][54][55][56][57].	48
3.18	Preço total aproximado do projeto.	49
4.1	Identificação dos módulos secundários.	58
5.1	Características do computador utilizado.	70

6.1	Teste ao alcance do módulo RFM95W.	90
-----	--	----

Lista de Acrónimos

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
CR	<i>Coding Rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DEE	Departamento de Engenharia Electrotécnica
DIO0	<i>Digital Input/Output 0</i>
DTLS	<i>Datagram Transport Layer Security</i>
EMA	Estações Meteorológicas Automáticas de Superfície
FAP	Força Aérea Portuguesa
FE	<i>Frequency Error</i>
FIFO	<i>First In, First Out</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoE	<i>Internet of Everything</i>

IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Ingress Protection</i>
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	Organização Internacional de Normalização
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide-Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machines</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MEEC	Mestrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores
MISO	<i>Master Input Slave Output</i>
MOHp	Observatório Meteorológico de Hohenpeissenberg
MOSI	<i>Master Output Slave Input</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NB-IOT	<i>Narrow-Band IoT</i>
NTC	Termistores de Coeficiente Negativo
OML	Observatório de Mauna Loa
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PHP	<i>PHP: Hypertext Preprocessor</i>
PTC	Termistores de Coeficiente Positivo
QOS	<i>Quality of Service</i>

RAM	<i>Random Access Memory</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RST	<i>Reset</i>
RTD	Detetor de Temperatura de Resistência
SASL	<i>Simple Authentication and Security Layer</i>
SCK	<i>Serial Clock</i>
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPA	<i>Single-Page Applications</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SS	<i>Slave Select</i>
TC	Termopar
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
TLS/SSL	<i>Transport Layer Security/ Secure Sockets Layer</i>
UC	<i>Unidade Curricular</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UV	Ultravioleta
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>

WIS	Sistema de Informação da WMO
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
XMPP	<i>Extensible Messaging and Presence Protocol</i>

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
c	velocidade da luz	m s^{-1}
f	frequência	Hz
λ	comprimento de onda	m

Capítulo 1

Introdução

Neste primeiro capítulo da dissertação é feita uma contextualização do trabalho a desenvolver, antes de serem discutidos os objetivos pretendidos para o projeto e são apresentadas a calendarização do mesmo e a organização do presente relatório.

1.1 Contextualização

Novas formas de observação atmosféricas, supercomputadores mais rápidos e avanços na ciência revolucionaram a previsão do tempo no final do século XX. Globalmente, hoje é possível fazer uma previsão meteorológica precisa com cerca de cinco dias de antecedência com a mesma precisão que era possível fazer para dois dias há cerca de 20 anos atrás. Isto permite, por exemplo, a previsão de fenómenos climáticos adversos com maior antecedência, permitindo que as pessoas se preparem e tomem as medidas adequadas e que, assim, se limite a perda de vidas e de propriedades. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), as expectativas de evolução são altas para avanços ainda maiores nesta área nos próximos anos [1]. Para a observação de fenómenos atmosféricos foram criadas estações meteorológicas que, segundo o Glossário Climatológico/Meteorológico criado pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), são sistemas que fornecem informações sobre os elementos atmosféricos que incluem vento, nebulosidade, temperatura e humidade relativa do ar, pressão atmosférica, precipitação e insolação. As estações meteorológicas podem ser estações meteorológicas simples, onde se executa pelo menos uma observação por dia, incluindo as temperaturas extremas do ar e a quantidade de

precipitação ou estações meteorológicas principais, onde se executam observações horárias, ou pelo menos tri-horárias, com apuramento dos valores horários a partir dos instrumentos registadores [2]. Neste contexto, surge este projeto no âmbito da *Unidade Curricular* (UC) da Tese/Dissertação, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores (MEEC), do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), que tem como propósito o desenvolvimento de uma estação meteorológica. Esta estação deverá tirar partido do avanço na área da IoT nos anos mais recentes no sentido de implementar um sistema de baixo custo, que permita a medição dos diferentes parâmetros atmosféricos e o seu posterior tratamento e apresentação numa interface apropriada.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é a construção de uma estação meteorológica capaz de medir os mais variados parâmetros atmosféricos como, por exemplo, a temperatura ambiente, a pressão e humidade atmosféricas, a velocidade do vento, entre outros. Tendo em conta este objetivo principal, foi dividido o projeto nas seguintes tarefas:

- **Medição de Parâmetros Atmosféricos** – a aquisição dos valores medidos pelos sensores é uma das tarefas mais importantes a implementar, uma vez que estes são a base de uma estação meteorológica.
- **Implementação de uma Comunicação *Wireless*** – após a medição dos valores por parte dos sensores, estes serão enviados para um servidor central onde será feito o seu tratamento. Para tal, será utilizada uma comunicação sem fios para estabelecer a ligação entre os sensores e o servidor.
- **Armazenamento de Dados** – os dados recolhidos pelos sensores deverão ser armazenados numa base de dados criada para esse efeito.
- **Criação de uma Interface para o Utilizador** – depois de recolhidos e armazenados os valores medidos, será necessário apresentar os mesmos numa interface desenvolvida para o utilizador. Para tal, deverá ser desenvolvido um *website* que será construído com recurso a uma *framework* de javascript.

O sistema deverá ser autónomo e operar em qualquer lugar, desde que cumpridos alguns requisitos, sobretudo os relacionados com os protocolos de comunicação. Uma alimentação independente para sistema é também importante, uma vez que este poderá ter de operar em áreas mais remotas, onde os tradicionais métodos de alimentação podem não estar disponíveis.

1.3 Plano de Trabalho

O projeto divide-se essencialmente em seis etapas distintas: a escrita do estado da arte, o planeamento da arquitetura do sistema, o desenvolvimento e implementação dos módulos secundários, a implementação do módulo principal e do servidor, o período de recolha dos parâmetros atmosféricos e a escrita do presente documento. Estas etapas estão ilustradas na Figura 1.1.

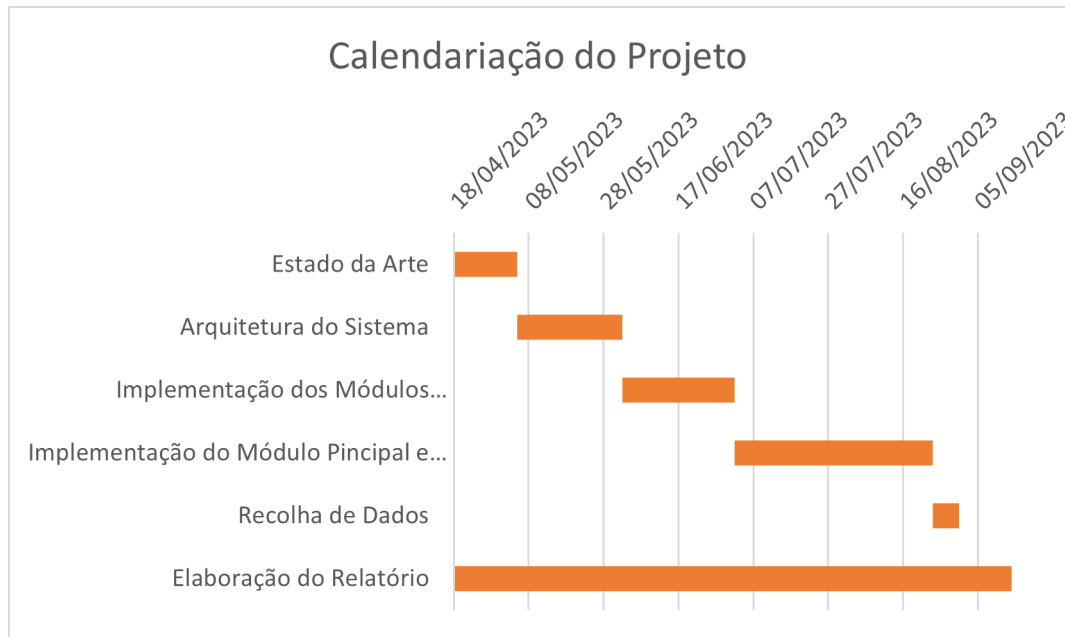


Figura 1.1: Calendarização do projeto.

1.4 Organização da Dissertação

O presente relatório encontra-se dividido em sete capítulos, que descrevem os passos seguidos no desenvolvimento deste projeto. No primeiro capítulo, é feita uma introdução ao trabalho a desenvolver, onde é discutido o contexto em que o projeto surge, onde são traçados os principais objetivos pretendidos para o mesmo e onde são apresentadas a calendarização do projeto e a organização do relatório. No segundo capítulo é apresentado um estudo sobre o estado da arte associado ao projeto a desenvolver, onde é feita uma pesquisa sobre a tecnologia atualmente existente que poderá ser útil no desenvolvimento do mesmo. O terceiro capítulo diz respeito à arquitetura do sistema a desenvolver, onde é apresentada a composição do sistema e onde são analisados e escolhidos os componentes a utilizar neste projeto. O quarto capítulo descreve a implementação do sistema com recurso ao material selecionado no capítulo anterior e à arquitetura descrita. De seguida, o quinto capítulo apresenta a implementação do servidor de controlo desenvolvido, assim como a interface de

utilizador. Já no capítulo seis são apresentados os resultados obtidos com a implementação do sistema projetado. Por último, este relatório termina com as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, assim como algumas futuras melhorias.

1.5 Resumo do Capítulo 1

Este primeiro capítulo da dissertação começou com uma contextualização do projeto a desenvolver, onde foi feita uma breve introdução às estações meteorológicas. De seguida, foram estabelecidos os principais objetivos a atingir no desenvolvimento deste trabalho e apresentada a calendarização do projeto em questão. Por último, o capítulo termina com uma descrição da organização do relatório.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo serão estudados vários temas relacionados com o trabalho a desenvolver. Começa-se por introduzir o conceito de IoT, onde são apresentadas as suas aplicações e os seus desafios atuais. De seguida, é analisado o tema das cidades inteligentes, mais precisamente os seus componentes e os desafios que estas apresentam. O terceiro tópico de análise diz respeito às estações meteorológicas, onde são apresentados alguns exemplos reais e analisados os tipos de sensores existentes para a medição de parâmetros meteorológicos. Depois é feita uma análise das tecnologias de comunicação existentes atualmente, quer para a comunicação entre os sensores e *gateway*, quer para a comunicação entre a *gateway* e o servidor. Por último, são apresentados dois casos de estudo de projetos que utilizam tecnologias semelhantes ao trabalho que se pretende desenvolver.

2.1 Internet of Things

A Internet of Things pode ser definida de várias formas distintas. No geral, esta refere-se a uma rede global e distribuída de objetos físicos que são capazes de detectar ou atuar sobre as variáveis dos seus ambientes e de comunicarem entre eles, ou com outras máquinas ou computadores. Estes objetos existem numa gama variável de tamanhos e capacidades, que incluem simples objetos com pequenos sensores, eletrodomésticos comuns, robôs industriais, carros, comboios, ou objetos de uso pessoal como relógios, pulseiras ou até mesmo camisolas. O valor destes objetos está relacionado com as grandes quantidades de informação que estes podem recolher

e com as suas capacidades de comunicação, permitindo o seu controlo e a análise da informação recolhida em tempo real. De forma semelhante a muitas tecnologias emergentes, diferentes autores podem usar diferentes termos para se referir a conceitos semelhantes. O processamento *Machine to Machine* (M2M) realça a partilha de dados e o processamento que ocorre entre esses dispositivos. Por outro lado, a *Internet of Everything* (IoE) inclui explicitamente as pessoas como participantes nesta rede global. Assim sendo, a aplicação da IoT a diferentes setores, representados na Figura 2.1 também lhe atribui termos específicos. Casas Inteligentes ou Edifícios Inteligentes referem-se a conceitos da IoT aplicados à gestão e controlo de edifícios, gestão essa que pode incluir o controlo da temperatura, da iluminação, de dispositivos de entretenimento, da segurança e de eletrodomésticos. Cidades Inteligentes tipicamente utilizam redes de sensores para maximizar a eficiência do tráfego, dos transportes públicos, da iluminação das ruas e de outras infraestruturas das cidades. As redes IoT a nível industrial (incluindo indústrias de serviços como, por exemplo, hospitais) podem ser referidas como a *Industrial Internet of Things* (IIoT) ou descritas como a arquitetura subjacente à Indústria 4.0, a (quarta) revolução industrial iminente. A interligação de dispositivos físicos à internet não é uma ideia recente. Contudo, o decréscimo do custo de algumas tecnologias, como o *Radio Frequency Identification* (RFID), e o aumento da cobertura e disponibilidade de redes móveis e sem fios, como o *Wireless Fidelity* (WiFi), criaram novas oportunidades. Para além disso, a *cloud* acedida através da internet proporciona agora uma plataforma de fácil acesso e baixo custo para o armazenamento e processamento das informações recolhidas pelos dispositivos IoT [3].

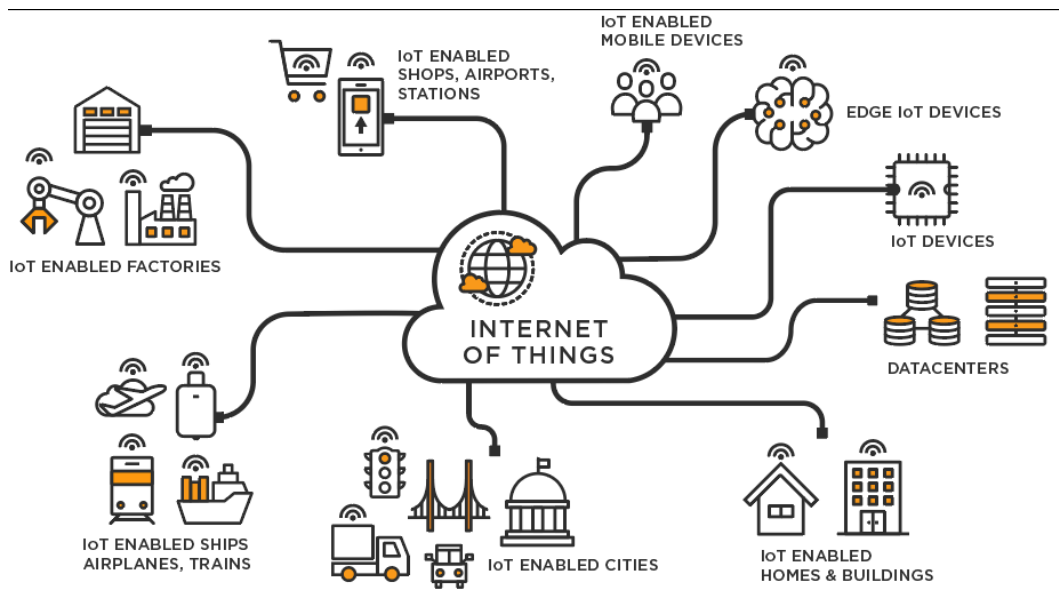


Figura 2.1: Exemplo de representação gráfica da Internet of Things [4].

2.1.1 Arquitetura Geral de Sistemas IoT

Uma arquitetura de IoT bem definida ainda não está estabelecida, no entanto, uma arquitetura de alto nível de três camadas é comumente aceita. Essa arquitetura é composta pela Camada de Percepção, pela Camada de Rede e pela Camada de Aplicação, como se observa na Figura 2.2. Assim sendo, estas camadas podem ser descritas da seguinte forma [5]:

- **Camada de Percepção** – a principal tarefa da camada de percepção é medir as propriedades físicas das coisas ao nosso redor que fazem parte da IoT. Além disso, essa camada encarrega-se de converter as informações em sinais digitais, mais convenientes para transmissão em rede. No entanto, alguns sensores podem não conseguir fazer medições diretas, pelo que microcontroladores podem ser associados a esses sensores para lhes adicionar capacidades de detecção e de processamento.
- **Camada de Rede** – a camada de rede é responsável por processar os dados recebidos da camada de percepção. Além disso, é responsável pela transmissão de dados para a camada de aplicação através de várias tecnologias de comunicação, como redes com ou sem fio e redes *Local Area Network* (LAN). Os principais métodos de transmissão incluem Wifi, Bluetooth, Zigbee, UWB, tecnologia infravermelha, entre outros. Enormes quantidades de dados serão transportadas pela rede, portanto, é crucial fornecer uma camada de rede sólida para armazenar e processar essa enorme quantidade de informação.
- **Camada de Aplicação** – a camada de aplicação usa os dados processados pela camada de rede e é a camada superior, que interage diretamente com o utilizador final. É responsável por fornecer interfaces e funcionalidades para o utilizador que lhe permitam aceder à informação recolhida e controlar os dispositivos IoT.

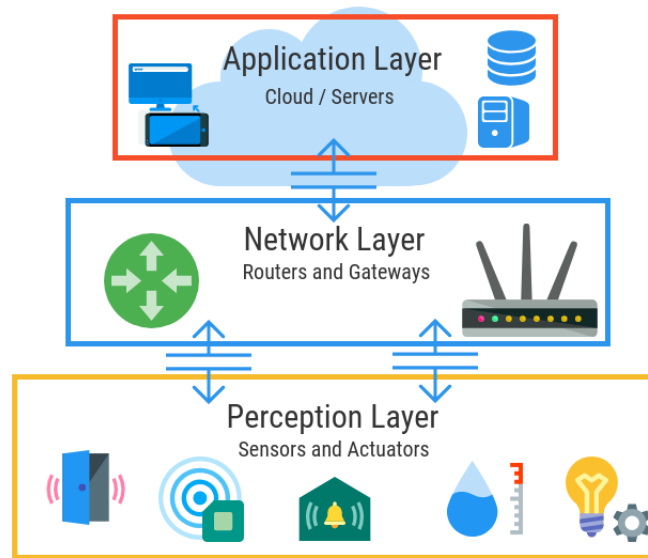


Figura 2.2: Arquitetura geral de um sistema IoT [6].

2.1.2 Aplicações da IoT

A utilização de dispositivos IoT é bastante benéfica nas mais diferentes áreas. Os seus utilizadores podem obter produtos ou serviços customizados, com base no que eles estão a fazer ou onde se encontram num determinado momento. Estes podem viajar com mais eficiência, evitando engarrafamentos quando o carro ligado a um dispositivo IoT sugere uma rota alternativa, com base no tráfego relatado por outros veículos. Podem também reduzir custos, uma vez que estes dispositivos permitem a redução do consumo de energia. Os utilizadores podem ser mais saudáveis, mais seguros e mais independentes com a ajuda de dispositivos de uso pessoal que fornecem *feedback* sobre o estado de saúde das pessoas que os utilizam. Outras áreas de aplicação da IoT são a indústria e os negócios. As empresas podem fornecer melhores produtos e serviços estudando o comportamento dos seus clientes, podendo desta forma descobrir necessidades de novos produtos ou serviços. As empresas podem proteger edifícios com recurso à segurança remota, proteger certos ativos como carros e máquinas industriais através da localização remota dos mesmos e garantir que os produtos mais sensíveis (como, por exemplo, produtos farmacêuticos) são armazenados consistentemente nas condições de temperatura e humidade corretas. Os dispositivos IoT nas empresas permitem que estas se possam tornar mais eficientes, através do uso de dispositivos de medição inteligentes, o que permite eliminar desperdícios. Os agricultores podem ser mais produtivos com irrigação inteligente que fornece água exatamente onde é preciso e quando é necessário. A automação da irrigação permite também evitar o uso desnecessário de água para a rega, como, por

exemplo, no caso de chuva. Estudos feitos estimam que até 2025 as organizações que adotaram totalmente a utilização da IoT serão 10% mais rentáveis do que os concorrentes que não o fizeram. A Academia Nacional de Ciências e Engenharia da Alemanha estima que as empresas podem ainda aumentar a sua produtividade em 30% com a implementação da Indústria 4.0. Os governos e as autoridades públicas podem também beneficiar da utilização da IoT. Por exemplo, a saúde e os custos de cuidados de longo prazo podem ser reduzidos com um apoio remoto aos que necessitam nas suas próprias casas. A segurança rodoviária pode ser aumentada com base na informação fornecida pelos milhares de condutores. A eficiência da iluminação das ruas e estradas pode também ser melhorada com a utilização destes dispositivos [3].

2.1.3 Desafios Atuais da IoT

Apesar dos esforços significativos feitos no a desenvolvimento da IoT, ainda existem vários desafios importantes [3]:

- **Padrões e a Interoperabilidade dos Dispositivos** – Os padrões são importantes na criação de mercados para novas tecnologias. Se dispositivos de diferentes fabricantes não seguem os mesmos padrões, a interoperabilidade dos mesmos será um problema a resolver, muitas vezes com recurso a dispositivos secundários. Padrões distintos podem também incentivar os consumidores a utilizar apenas uma família de produtos se, por exemplo, os consumidores não conseguem transferir os seus dados facilmente quando substituem um certo dispositivo por outro de um fabricante diferente. Neste sentido, a Comissão Europeia sublinhou a necessidade de desenvolver padrões tecnológicos para apoiar a IoT.
- **Segurança** – A IoT apresenta alguns riscos de segurança quer para os consumidores, quer para indústria. Ataques informáticos podem permitir a certas pessoas um acesso não autorizado a informação pessoal e sensível, servidores que guardam grandes quantidades de informação podem ser atacados e *Hackers* podem também ganhar o controlo de redes locais e de dispositivos e a partir daí perturbar o correto funcionamento dos mesmos, o que pode ter grandes consequências. Em contrapartida, as empresas podem minimizar estes riscos de segurança tendo algumas considerações no desenvolvimento dos seus produtos IoT: Apenas recolher informação essencial, implementação de várias camadas de defesa contra ameaças externas, encriptação de dados, etc.
- **Privacidade e Proteção de Dados** – Dispositivos IoT geralmente recolhem dados pessoais e privados, sejam eles informações sobre a localização dos utilizadores, sobre os seus hábitos diários ou sobre o seu estado de saúde. Os dados

podem ser partilhados com outros dispositivos ou com terceiros, sem que o utilizador tenha oportunidade para rever esses dados. Muitos dispositivos, como pulseiras IoT, não possuem grandes ecrãs, o que dificulta o fornecimento de informações ao consumidor sobre possíveis usos dos seus dados e obter o seu consentimento, uma vez que o consentimento é necessário não apenas para recolher dados, mas também para analisá-los ou para partilhá-los com terceiros.

2.2 Cidade Inteligentes

Nos últimos anos tem sido observado que uma parte considerável da população mundial tem apresentado tendência em deslocar-se para ambientes urbanos, estando previsto que até 2030 mais de 60% da população mundial viverá num ambiente urbano [7]. Alguns dos sistemas concebidos para enfrentarem os desafios criados pelo aumento da população podem contribuir para o desenvolvimento de uma Cidade Inteligente. O conceito de Cidade Inteligente está presente num ambiente urbano complexo, incorporando vários sistemas complexos de infraestrutura, comportamento humano, tecnologia, estruturas sociais e políticas e economia [8]. Uma Cidade Inteligente oferece uma forma inteligente de gerir diferentes áreas como o transporte, a saúde, a energia, as residências, o ambiente, entre outros (Figura 2.3). Os dados gerados por esses componentes são principalmente obtidos através de redes de sensores sem fio [7].

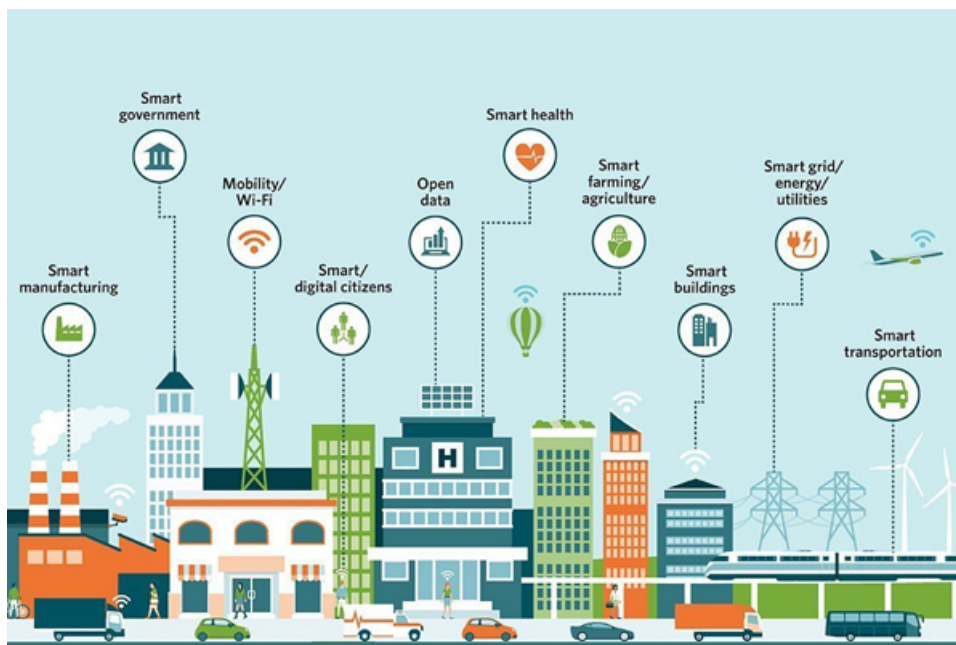


Figura 2.3: Componentes de uma Cidade Inteligente [9].

2.2.1 Componentes de uma Cidade Inteligente

Como já foi referido, uma Cidade Inteligente é composta por vários componentes distintos :

- **Economia** – As cidades estão no centro da atividade económica e as oportunidades financeiras das mesmas desempenham um papel importante no seu desenvolvimento. A economia inteligente inclui fatores relacionados com a competitividade económica como a inovação, o empreendedorismo, as marcas, a produtividade, a flexibilidade do mercado de trabalho e a integração no mercado internacional [10].
- **Governo** – O governo inteligente é considerado uma característica bastante importante da implementação e na gestão de uma cidade inteligente e tem como objetivos melhorar os serviços públicos e sociais, aumentar a transparência no governo, a inclusão das pessoas na tomada de decisão, entre outros [11].
- **Ambiente** – O termo ambiente inteligente é definido como uma tecnologia que fornece soluções para muitos problemas de aplicação ambiental, relacionados com a qualidade da água, com a poluição do ar, com o clima, com a monitorização dos níveis de radiação, com a gestão de resíduos, com desastres naturais e com muitos outros indicadores de foro ambiental, o que fornece grandes benefícios ambientais que levam à possibilidade de alcançar um mundo e um estilo de vida mais sustentáveis [12].
- **Saúde** – A saúde inteligente é um sistema de serviços de saúde que tira partido de algumas tecnologias como dispositivos vestíveis, IoT e internet móvel para aceder dinamicamente às informações de saúde dos pacientes e para responder ativamente e de forma mais rápida às necessidades dos mesmos. Os cuidados de saúde inteligentes podem promover a interação entre todas as partes do campo da saúde, garantir que os utilizadores obtêm os serviços de que precisam, ajudar as partes envolvidas a tomar decisões informadas e facilitar a alocação racional de recursos médicos [13].
- **Residências** – Uma casa inteligente é uma residência equipada com tecnologias inteligentes destinadas a fornecer serviços personalizados para os moradores. As tecnologias inteligentes permitem monitorizar, controlar e auxiliar os residentes, o que pode melhorar a sua qualidade de vida e promove um estilo de vida mais independente. Para facilitar a implementação e adoção da tecnologia das casas inteligentes, é importante ter em consideração a perspetiva do utilizador, de modo a fornecer um serviço mais personalizado [14].
- **Mobilidade** – O congestionamento do tráfego e a poluição do ar continuam a ser preocupações sérias, especialmente nas grandes cidades. O transporte

urbano enfrenta desafios um pouco por todo o mundo, tais como a poluição do ar e o uso ineficiente de recursos, que muitas vezes se opõem ao desenvolvimento económico. A mobilidade inteligente tem como principais objetivos reduzir os engarrafamentos, os tempos das viagens e os acidentes rodoviários, para além de permitir aos passageiros personalizarem suas viagens [15].

2.2.2 Desafios das Cidades Inteligentes

A implementação de uma cidade inteligente enfrentará diversos problemas durante as etapas de conceção, construção e operação. Custos operacionais e de *design*, interoperabilidade de dispositivos, recolha e análise de quantidades de informação enormes, segurança de dados e sustentabilidade são alguns dos desafios possíveis. Apesar das grandes vantagens dos diferentes componentes das cidades inteligentes descritas anteriormente, estes possuem também algumas limitações, apresentadas na Tabela 2.1 [16].

Tabela 2.1: Limitações apresentadas pelos diferentes componentes [16].

Componentes	Desvantagens
Governos	Dificuldades na recolha e análise de dados
Ambiente	Acessos potencialmente difíceis
Saúde	Redes imprecisas
Residência	Custo elevado, dependência da internet e de profissionais
Mobilidade	Perturbações nas redes podem levar a acidentes

2.3 Estações Meteorológicas

Atualmente, mais de 30 satélites meteorológicos e 200 satélites de pesquisa, 10000 estações meteorológicas manuais e automáticas, 1000 estações aéreas, 7000 navios, mais de 1100 estações flutuantes, centenas de radares meteorológicos e 3000 aeronaves comerciais especialmente equipadas medem parâmetros chave da atmosfera, da terra e dos oceanos todos os dias. Estas observações são posteriormente disponibilizadas gratuitamente para todos os países do mundo através do Sistema de Informação da WMO (WIS). Meteorologistas e cientistas do clima conseguem agora fazer previsões meteorológicas com maior antecedência para corresponder à crescente necessidade de previsão do tempo em setores chave como a agricultura, a saúde, a água, o transporte e a energia. Mas nos dias que correm não se trata apenas da previsão do tempo e do clima. Com a melhoria dos sistemas de previsão meteorológicos e com a melhoria do conhecimento do sistema terrestre em geral, tornou-se também importante a partilha das informações recolhidas com outras áreas como a hidrologia, a composição atmosférica, a criosfera e o clima espacial [17].

2.3.1 O que são Estações Meteorológicas

Estações Meteorológicas (Figura 2.4) são sistemas compostos por uma série de sensores cujo objetivo é fazer a monitorização meteorológica, através da medida e do armazenamento dos valores de uma série de parâmetros meteorológicos como, por exemplo, a temperatura, a pressão atmosférica, a radiação solar, etc. Estes sistemas possuem normalmente uma série de sensores sem fios, sendo que podem variar consideravelmente na sua qualidade e preço, quer em termos da capacidade do *software*, quer em termos da precisão e durabilidade dos seus sensores [18].



Figura 2.4: Estação meteorológica [19].

2.3.2 Tipos de Estações Meteorológicas

Para além das estações de observação terrestres comuns, existem também estações noutros meios como o aquático e o aéreo, e até mesmo no espaço.

Estações Marítimas

As observações marítimas numa definição mais ampla cobrem quaisquer observações ambientais na interface ar-mar, abaixo da superfície do mar e no ar acima da superfície do mar. As observações podem ser feitas em plataformas fixas ou móveis, e de forma local ou remota, sendo usadas técnicas baseadas na superfície ou no espaço. As medições locais são essencialmente observações destinadas a serem representativas da área marítima que envolve a estação. Técnicas de medição remotas normalmente cobrem uma grande área da superfície ou volume de água, o

que é particularmente apropriado para observações de gelo marinho. No que toca à observação meteorológica a nível marítimo, existem várias possibilidades para a implementação das mesmas [20]:

- **Navios** – Estações meteorológicas automáticas ou sistemas parcialmente automatizados estão cada vez mais a serem usados em navios (Figura 2.5), quer para fins de observação quer para transmissão de dados [20].



Figura 2.5: Estação Meteorológica num navio [21].

- **Boia amarradas** – As boias amarradas (Figura 2.6) apresentam uma grande variedade de configurações como, por exemplo, em termos do tipo de amarração, tipos de sensores, esquemas de amostragem dos parâmetros, técnicas de montagem e de telemetria) possuindo uma ampla variedade de aplicações para pesquisa [20].



Figura 2.6: Estação Meteorológica numa boia amarrada [22].

- **Torres e Plataformas** – Em torres (geralmente em águas pouco profundas perto da costa), representadas na Figura 2.7, e em plataformas em locais mais remotos, é também possível a operação de estações meteorológicas. Neste tipo de estação sensores adicionais são frequentemente utilizados como, por exemplo, sensores de ondas e sensores para medir o nível médio da água do local onde se encontram [20].



Figura 2.7: Estação Meteorológica numa torre [23].

Estações Aéreas

As observações a nível aéreo começaram em 1749 na Europa com o uso de um papagaio para carregar um termómetro e, assim, medir a temperatura a uma altitude superior. Atualmente, duas vezes por dia, sete dias por semana, cerca de 900 estações no mundo inteiro lançam balões meteorológicos (Figura 2.8) para a atmosfera para obter informações meteorológicas a altitudes superiores. Por baixo do balão cheio de hélio ou de hidrogénio, um pequeno instrumento, chamado radiossonda, é enviado com o objetivo de transmitir dados meteorológicos contínuos para o local onde foi lançado. Normalmente, a radiossonda é composta por um transmissor de rádio, um GPS e por sensores de temperatura, de humidade e de pressão [24].

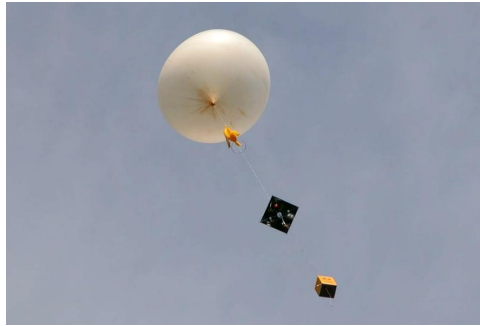


Figura 2.8: Balão meteorológico [25].

Satélites meteorológicos

As estações meteorológicas em satélites referem-se à aplicação de técnicas de medição de parâmetros de forma remota por satélite para a medição e observação de meteorologia quer ao nível da superfície terrestre, quer nas camadas da troposfera e da estratosfera. Os sistemas de satélite meteorológicos (Figura 2.9) têm evoluído continuamente, e espera-se que novos sistemas em desenvolvimento estejam operacionais dentro de alguns anos. Tipicamente, estes satélites orbitam a Terra a altitudes variadas (como a 850 ou 36000 quilómetros de altitude) e são usados para obter imagens e informações quantitativas sobre as características da superfície terrestre e de uma altitude de até 20 km. Em comparação com os restantes métodos de observação apresentados, estes sistemas apresentam algumas vantagens e desvantagens, evidenciadas na Tabela 2.2 [20].

Tabela 2.2: Vantagens e desvantagens de satélites meteorológicos [20].

Vantagens	Desvantagens
Cobertura global, incluindo áreas remotas na terra e nos oceanos	Parâmetros atmosféricos e hidrológicos não medidos diretamente
Alta resolução em grandes áreas	Calibração dos instrumentos de medida requer atenção constante
Ampla gama de parâmetros a serem medidos	Elevado tempo de reparação e substituição de equipamento
Medição simultânea de vários parâmetros	Falha dos sensores pode resultar em perda de dados total
Relação custo/benefício favorável para um alto volume de dados	Parâmetros de superfície e da baixa atmosfera podem ser medidos apenas parcialmente em caso de nuvens espessas



Figura 2.9: Satélite meteorológico norte americano [26].

2.3.3 Exemplos de Estações Meteorológicas

Das milhares de estações meteorológicas atualmente em funcionamento um pouco por todo o mundo, algumas se distinguem por terem características específicas, pelo que é possível destacar as seguintes:

- **Observatório de Mauna Loa, Havai, Estados Unidos** – O Observatório de Mauna Loa (OML), apresentado na Figura 2.10, está localizado a norte do vulcão Mauna Loa, na ilha do Havai, a uma altitude de 3397 metros, ou a 11.135 pés acima do nível do mar. O observatório é uma instalação de pesquisa atmosférica de alto nível que monitoriza e recolhe continuamente dados relacionados com mudança atmosférica desde a década de 1950. No entanto, recentemente as medições do OML foram interrompidas devido a uma erupção do vulcão Mauna Loa, que impediram o acesso dos funcionários ao local e interrompeu a alimentação da estação [27].

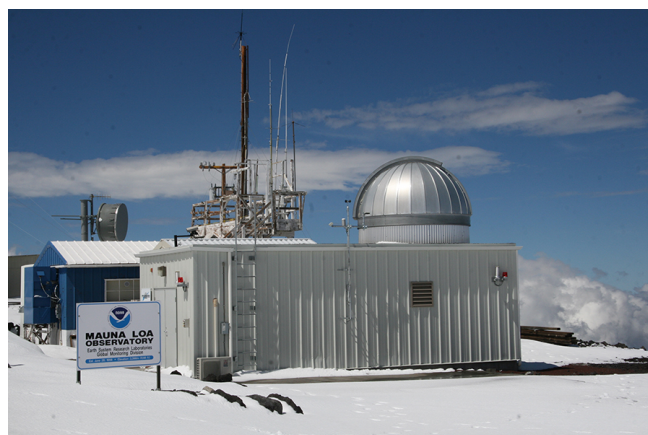


Figura 2.10: Observatório de Mauna Loa [28].

- **Observatório meteorológico de Hohenpeissenberg, Alemanha** – O Observatório Meteorológico de Hohenpeissenberg (MOHp) (Figura 2.11) destaca-se por ser uma das estações meteorológicas mais antigas em funcionamento. Com o início das suas observações em 1781, o MOHp tem sido um local de observação permanente na paisagem rural da cidade de Hohenpeissenberg, com foco principal em observações meteorológicas e, mais recentemente, em processos de precipitação, ozono e composição atmosférica [29].



Figura 2.11: Observatório meteorológico de Hohenpeissenberg [30].

2.3.4 Estações Meteorológicas em Portugal

Em Portugal, a rede meteorológica/climatológica clássica de superfície é composta por uma rede principal de 31 estações climatológicas principais (25 continentais, incluindo 6 estações da Força Aérea Portuguesa (FAP); Açores: 9; Madeira: 3). As principais estações meteorológicas emitem relatórios sinóticos (dados meteorológicos codificados) em tempo real com divulgação regional, nacional e mundial. O IPMA concluiu o desenvolvimento de um projeto com várias etapas para a instalação de uma rede de Estações Meteorológicas Automáticas de Superfície (EMA) em Portugal Continental e Ilhas dos Açores e Madeira, permitindo a modernização da rede de observação de superfície no território português. Este sistema está em funcionamento e em expansão desde 1996, permitindo uma quantidade crescente de informações meteorológicas/climatológicas para serem automaticamente tratadas na sede do IPMA. Atualmente, a rede nacional de EMA encontra-se em funcionamento operacional no IPMA desde Junho de 2002 com 93 EMA (78 no Continente, 9 no arquipélago dos Açores e 6 no arquipélago da Madeira), as quais registam de 10 em 10 minutos os elementos meteorológicos principais e elaboram de forma automática mensagens em forma de código que são enviadas à escala horária para a sede do IPMA e difundidas

internacionalmente. Em território nacional, algumas das estações meteorológicas mais significativas incluem a Estação meteorológica da sede do IPMA, a Estação meteorológica do Observatório Meteorológico de Coimbra e a Estação meteorológica do Pico, apresentada na Figura 2.12 [31].



Figura 2.12: Estação meteorológica do Pico do Areiro, Madeira [32].

2.3.5 Parâmetros Meteorológicos

A medição de parâmetros meteorológicos é a base de qualquer estação meteorológica, pelo que é importante estudar algumas formas de medição dos mesmos.

Temperatura

A medição da temperatura é um processo com mais de 100 anos, no entanto, o desenvolvimento de sensores e termómetros para esse efeito continua nos dias de hoje. A otimização contínua deste processo leva a uma maior exigência dos aparelhos de medição para que estes efetuem medições mais rápidas, mais precisas e com uma maior repetibilidade durante mais tempo [33]. Dos métodos de aquisição do valor da temperatura, destacam-se os seguintes:

- **Termopar (TC)** – Um termopar consiste na junção de dois fios de compostos por metais diferentes como, por exemplo, o ferro e o constantan, que são unidos numa das extremidades para formar uma junção quente. A medição da temperatura é feita nessa mesma junção, que está em contacto o meio/objeto que se pretende medir. A outra extremidade dos fios condutores do TC forma uma junção fria (ou de referência), e corresponde ao local onde é medido o valor de tensão gerado em função da temperatura medida na junção quente. Existem diversos tipos de TC, que variam conforme os materiais utilizados na sua construção: tipo E (cromel e constantan), tipo J (ferro e constantan), tipo K (cromel e alumel), tipo R e S (platina e ródio) e tipo T (cobre e constantan).

Estes tipos diferentes de TC geram diferentes valores de tensão em função da temperatura medida, como se observa na Figura 2.13 [34].

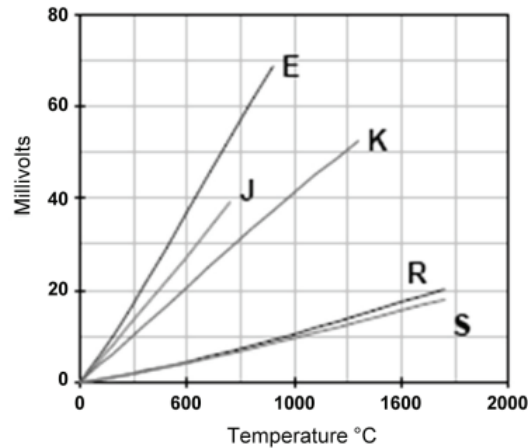


Figura 2.13: Variação da tensão em função da temperatura, nos diferentes tipos de TC [34].

- **Detetor de Temperatura de Resistência (RTD)** – O princípio de funcionamento de um RTD baseia-se fundamentalmente na variação da resistência de um objeto metálico em função da variação da temperatura, um fenómeno conhecido como termo-resistividade. Assim sendo, a medição de um valor de temperatura pode ser feita medindo a resistência do elemento RTD. As características termo-resistivas dos elementos de deteção RTD variam conforme o metal ou liga usados na sua construção. Os materiais usados para a produção de RTD variam, sendo o material mais comum a platina, devido à sua elevada precisão e repetibilidade nas medições [34].
- **Termístores** – Os termístores são resistências que variam em função da temperatura, normalmente construídos a partir de óxidos metálicos. A variação da resistência com a temperatura é alta em comparação com as resistências metálicas, e geralmente é negativa: a resistência diminui com o aumento da temperatura. As características de temperatura são altamente não lineares. Esses termístores, com um coeficiente de temperatura negativo, são chamados de Termístores de Coeficiente Negativo (NTC). Existem também os Termístores de Coeficiente Positivo (PTC), mas não são de uso tão comum para medição de temperatura. Os termístores conseguem efetuar medições no intervalo de temperatura de cerca de -100°C a 300°C , dependendo do seu material constituinte [35].
- **Pirómetros** – Os pirómetros correspondem a termopares que conseguem efetuar a medição da temperatura sem entrarem em contacto com o objeto a

medir. Estes instrumentos usam a radiação térmica emitida por um corpo e convertem essa grandeza num valor de temperatura [33].

Pressão Atmosférica

A pressão atmosférica sobre uma determinada superfície é a força por unidade de área exercida devido ao peso da atmosfera. A pressão é, portanto, igual ao peso de uma coluna vertical de ar acima de uma projeção horizontal da superfície, estendendo-se até o limite externo da atmosfera, e é um parâmetro importante a medir pelas estações meteorológicas. De forma semelhante à temperatura, existem várias formas de medir a pressão atmosférica [20]:

- **Barómetro de Mercúrio** – O barómetro de mercúrio (Figura 2.14) é composto por um tubo de vidro fechado em cima e aberto por baixo, onde existe uma reserva de mercúrio. O mercúrio presente no tubo ajusta-se de acordo com a pressão atmosférica acima da reserva. À medida que a pressão aumenta, o mercúrio é forçado a subir no tubo. Ultimamente tem havido um afastamento cada vez maior do uso de barómetros de mercúrio devido ao facto do vapor de mercúrio ser altamente tóxico.

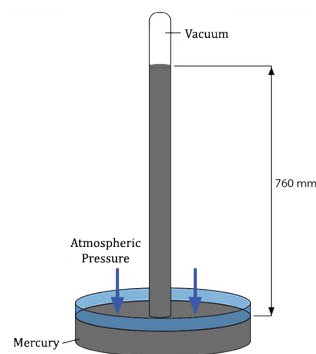


Figura 2.14: Barómetro de mercúrio [36].

- **Barómetro Aneróide** – Um barómetro aneróide possui uma câmara de metal selada que se expande e contrai, em função da pressão atmosférica ao seu redor. Esta expansão/contração da câmara é posteriormente convertida num valor de pressão atmosférica. No entanto, os barómetros aneróides possuem menor precisão do que os barómetros de mercúrio.
- **Barógrafos** – Um barógrafo é um barómetro com um princípio de funcionamento semelhante ao barómetro aneróide, mas utiliza uma espécie de caneta para registar a pressão medida de forma gráfica.

Humidade Atmosférica

A humidade é uma das grandezas físicas mais medidas e é de grande importância em várias áreas diferentes. Existem várias formas de medir este parâmetro, através de diferentes tipos de sensores [37]:

- **Sensores Capacitivos** – O nível de humidade relativa do ambiente é medido pela deteção de mudanças induzidas pela humidade na constante dielétrica de uma das camadas presentes no sensor. Aproximadamente 75% dos sensores de humidade disponíveis atualmente no mercado são sensores capacitivos. Os sensores de humidade capacitivos oferecem várias vantagens, incluindo o consumo de energia muito baixo e a elevada precisão.
- **Sensores Resistivos** – O mecanismo de transdução dos sensores de humidade resistivos envolve as mudanças na condutividade elétrica do sensor causadas pela absorção do vapor de água presente na atmosfera. Tipicamente, sensores deste tipo utilizam três categorias principais de materiais: cerâmica, polímeros e eletrólitos.
- **Piezoresistivos** – Os materiais piezoresistivos oferecem uma ampla gama de aplicação em sensores feitos pelo Homem. Estes materiais piezoresistivos são usados em sensores de humidade para detetar a deformação de uma camada destes sensores provocada por mudanças no nível de humidade da atmosfera.
- **Sensores Gravimétricos** – Os sensores gravimétricos são sensores que dependem de perturbações e mudanças na massa do sensor durante a interação com o vapor de água presente na atmosfera.
- **Sensores Óticos** – Os sensores de humidade de fibra ótica são baseados na interação colorimétrica de materiais localizados na superfície destes sensores. O mecanismo de deteção depende de uma mudança no índice de refração da luz provocada pela humidade presente na atmosfera, o que faz com que a intensidade ótica transmitida através da seção de deteção do sensor varie também.

Precipitação

No que toca à medição das quantidades de precipitação, os pluviómetros são os instrumentos mais comuns. A medição da precipitação é muito sensível à exposição e, em particular, ao vento. Existem vários tipos de pluviómetros, como os pluviómetros comuns, os pluviómetros de balde basculante e os pluviómetros de sifão. Nos pluviómetros de balde basculante (Figura 2.15), dois reservatórios com medidas pré-definidas são constantemente encheidos com a água e drenados. Sempre que cada

um dos reservatórios enche na totalidade, é gerado um sinal elétrico que permite a recolha automática dos valores de precipitação [20].

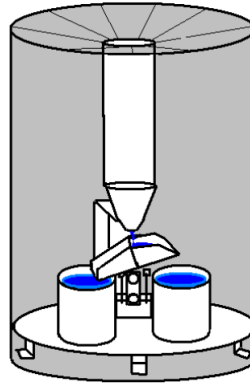


Figura 2.15: Pluviômetro de balde basculante [38].

Radiação

A medição da radiação é importante para as mais diversas razões, incluindo para estudar a transformação da energia na Terra ou para analisar as propriedades da atmosfera, no que toca aos seus constituintes. Para a medição da radiação solar, são utilizados pireliômetros, instrumentos que medem a intensidade da radiação solar direta numa superfície perpendicular aos raios solares. A luz solar entra no pireliômetro pela parte superior, sendo que a quantidade de radiação é depois convertida num sinal elétrico, que, por sua vez, é usado para determinar o valor de radiação da luz solar [20].

2.4 Tecnologias de Comunicação

Depois de introduzidos e analisados os conceitos de IoT e de Cidades Inteligentes, são agora estudadas as tecnologias de comunicação existentes para suportar estes sistemas. As tecnologias de comunicação IoT são responsáveis por interligar os diferentes dispositivos IoT. A boa operação destes sistemas depende de uma comunicação segura e em tempo real entre os dispositivos e entre os dispositivos e a *cloud*. A escolha entre os diferentes protocolos existentes deve ser feita tendo em consideração as suas características de operação como, por exemplo, o alcance ou a velocidade de transmissão de dados. Num sistema IoT existem essencialmente dois tipos de comunicação: entre os diferentes dispositivos e uma *gateway* e entre a *gateway* e a *cloud* [39]. De seguida serão abordados alguns dos protocolos frequentemente utilizados para a comunicação entre os dispositivos IoT e a *gateway*.

2.4.1 WiFi

O WiFi, baseado no padrão do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11, é uma família de tecnologias frequentemente usadas para redes *Wireless Local Area Network* (WLAN). Este protocolo fornece conexões de banda larga sem fio de última linha para a ligação de dispositivos à internet com maior cobertura e taxas de transmissão de dados mais elevadas. Este protocolo evoluiu durante várias gerações para oferecer suporte a taxas de transferência mais altas. Especificamente, o IEEE 802.11a e o IEEE 802.11b foram introduzidos em 1999, onde o IEEE 802.11a permite o suporte de taxas de transmissão de dados de até 54 Mbps em 5 GHz, enquanto que o IEEE 802.11b permite até 11 Mbps em 2,4 GHz. Em 2003, o IEEE 802.11g foi lançado com uma taxa de dados máxima de 54 Mbps em 2,4 GHz. Devido à elevada exigência da evolução tecnológica, novas gerações de WLAN (o IEEE 802.11n e o IEEE 802.11ac) foram lançadas em 2008 e 2014, respetivamente. Estas novas gerações podem alcançar taxas de transmissão muito mais altas (até 600 Mbps no IEEE 802.11n e 7 Gbps no IEEE802.11ac) com uma cobertura mais ampla em comparação com as anteriores (IEEE 802.11a/b/g). Em 2017 foi também introduzido o IEEE 802.11ah (WiFi HaLow) com o objetivo de dar suporte à IoT com maior cobertura (até 1 km) e consumo de energia mais baixo. O WiFi HaLow opera nas bandas de frequência não licenciadas sub-1GHz e sua ocupação de largura de banda é geralmente de apenas 1MHz ou 2MHz, sendo que em alguns países são também permitidas larguras de banda mais elevadas de até 16MHz. Comparado às gerações WiFi de alta velocidade, o IEEE 802.11ah visa fornecer conectividade a milhares de dispositivos com cobertura de até 1 km, mas a sua taxa de dados máxima é de cerca de 300 Mbps utilizando largura de banda de 16 MHz [40].

2.4.2 ZigBee

O ZigBee é um protocolo de comunicação sem fios de curto alcance para redes *Wireless Personal Area Network* (WPAN), baseado no padrão IEEE 802.15.4. Atualmente, o ZigBee é considerado útil para uma variedade de aplicações de IoT, incluindo automação residencial, monitorização industrial e saúde [41]. Algumas características do ZigBee incluem o baixo custo, baixa taxa de transmissão de dados e alcance de transmissão relativamente curto. O ZigBee opera nas bandas de frequência não licenciadas, principalmente a 2.4 GHz e, opcionalmente, a 868 MHz e a 915 MHz e permite a ligação de até 255 dispositivos simultaneamente. O alcance da transmissão pode variar de poucos metros até cerca de 100 metros [40].

2.4.3 LoRa

O *Long Range* (LoRa) é um protocolo *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) que utiliza a técnica de modulação de sinais *Chirp Spread Spectrum* (CSS), o que

aumenta a resistência a ruídos externos ao sinal. Em 2015, um protocolo de comunicação baseado em LoRa chamado LoRaWAN foi estabelecido pela LoRa-Alliance. O LoRaWAN baseia-se numa topologia de estrela, onde *gateways* fazem a ligação entre os dispositivos e a rede [40]. Neste protocolo, foram definidos 3 tipos de classes diferentes: dispositivos de Classe A, que possuem o menor consumo de energia; os de Classe B que permitem a receção de mensagens de forma calendarizada; e os de Classe C, que possuem janelas de receção de mensagens praticamente contínuas, o que, por consequência, aumenta o consumo de energia. Possui alcances de cerca de 5 Km em meio urbano e 20 Km em meio rural [42]. Na Figura 2.16 é demonstrada a cobertura da rede LoRa no distrito do Porto.

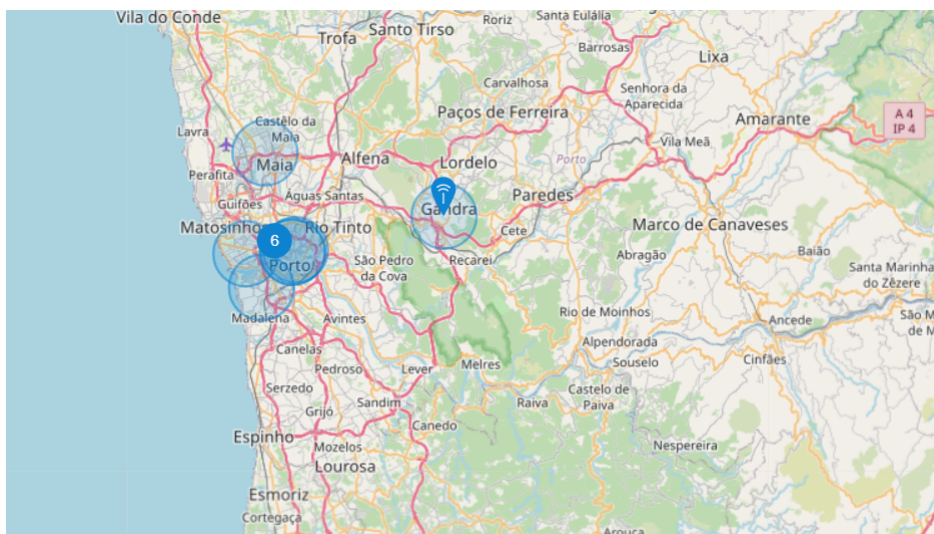


Figura 2.16: Cobertura LoRa no Porto [43].

2.4.4 Sigfox

O SigFox é outra solução LPWAN não licenciada dominante no mercado. Este protocolo propõe o uso de uma tecnologia de banda muito estreita, o *Ultra Narrow Band* (UNB), com apenas 100 Hz de largura de banda para transmissão. Graças à tecnologia UNB, o Sigfox permite menor consumo de energia para dispositivos e suporta uma cobertura superior em comparação com LoRA, no entanto, com uma taxa de transmissão de dados mais baixa. Sigfox foi inicialmente introduzido para suportar apenas comunicação de *uplink*, mas evoluiu posteriormente para uma tecnologia bidirecional. No entanto, o número de mensagens de *uplink* é limitado a apenas 140 por dia e o tamanho máximo de cada mensagem é limitado a 12 bytes. Possui alcances de cerca de 10 Km em meio urbano e 50 Km em meio rural [40].

2.4.5 LTE-M

O *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) é uma versão simplificada do *Long Term Evolution* (LTE), também conhecido como 4G, que tem como objetivo minimizar o consumo de energia e aumentar o alcance. No entanto, reduz também a largura de banda de 20 MHz para 1.4 MHz. O LTE-M suporta comunicações *full duplex* e, opcionalmente, *half duplex* para reduzir o consumo de energia [44].

2.4.6 NB-IoT

O *Narrow-Band IoT* (NB-IOT) é, à semelhança do LTE-M, um protocolo baseado no LTE, com uma banda estreita de 200 KHz o que, como resultado, reduz a taxa de transmissão de dados. Por outro lado, o NB-IoT possui um consumo energético inferior em comparação com o LTE-M, para além de um alcance superior de 1 Km em meios urbanos e de 10 Km em meios rurais. O NB-IoT possui três modos de operação: *standalone*, *in band* e *guard band* [45].

Como referido, as técnicas de comunicação abordadas anteriormente dizem respeito a comunicações entre os dispositivos IoT e a *gateway*. De seguida, serão estudadas as tecnologias da comunicação existentes para a interligação da *gateway* ao servidor.

2.4.7 MQTT

O *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) é um protocolo de transporte de mensagens baseado na arquitetura *publish/subscribe*. A primeira versão do protocolo MQTT foi introduzida em 1999 por Andy Stanford-Clark e Arlen Nipper. A versão MQTT v3.1 foi adotada pelo consórcio OASIS em 2013 e também certificado pela Organização Internacional de Normalização (ISO). O MQTT consiste em clientes que se comunicam entre si através de *brokers*, que recebem e distribuem as mensagens entre os clientes, como se observa na Figura 2.17. O cliente MQTT pode assumir o papel de um *publisher* ou *subscriber*. Existem três níveis de *Quality of Service* (QOS) no protocolo MQTT: no máximo uma vez, pelo menos uma vez e exatamente uma vez. O MQTT usa o protocolo *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) para transmissão de dados e o *Transport Layer Security/ Secure Sockets Layer* (TLS/SSL) (TLS/SSL), que oferece segurança nas comunicações. O tamanho da mensagem pode variar de acordo com os requisitos da sua aplicação, sempre igual ou inferior a 256 MB, com um cabeçalho de 2 bytes. Atualmente, o MQTT é usado em várias plataformas diferentes, como o Amazon Web Services, Microsoft Azure IoT, Adafruit, Facebook Messenger, etc [46].

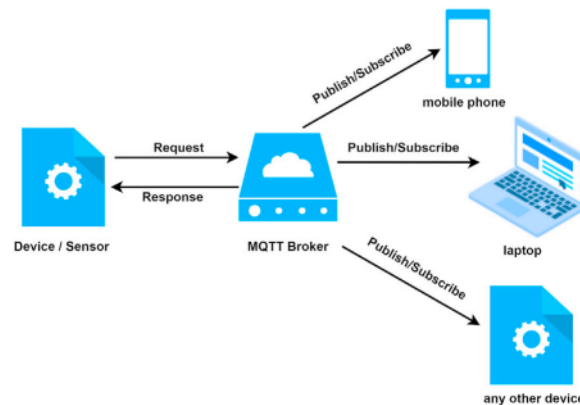


Figura 2.17: Arquitetura do MQTT [46].

2.4.8 CoAP

O *Constrained Application Protocol* (CoAP) é um protocolo de transferência da *web* para dispositivos com recursos limitados e é baseado no modelo *Representational State Transfer* (REST), de forma semelhante ao *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). O CoAP utiliza o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) como protocolo de transporte em vez do *Transmission Control Protocol* (TCP) e *Datagram Transport Layer Security* (DTLS). O CoAP depende de uma estrutura cliente/-servidor de forma semelhante ao HTTP, onde um cliente solicita os dados através dos métodos GET, PUT, POST e DELETE. O CoAP inclui quatro tipos de mensagens: *Confirmable* (CON), *Non Confirmable* (NON), *Acknowledgement* (ACK) e *Reset* (RST). Desta forma, diferentes níveis de QoS são definidos. Na Figura 2.18 é possível observar a arquitetura simplificada do CoAP [46].

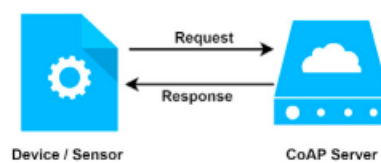


Figura 2.18: Arquitetura do CoAP [46].

2.4.9 XMPP

O *Extensible Messaging and Presence Protocol* (XMPP) é um padrão de mensagens instantâneas *Internet Engineering Task Force* (IETF) usado para múltiplas sessões, chamadas de voz e de vídeo e para teleconferências. O XMPP é desenvolvido pela comunidade de código aberto Jabber como um protocolo de mensagens seguro, protegido contra *spam* e independente. O XMPP permite que os utilizadores comuniquem entre si a partir de qualquer sistema operacional enviando mensagens instantâneas

através da internet. Fornece também recursos adicionais como autenticação, controle de acessos, medidas de privacidade, entre outros [46]. Estes recursos tornam o XMPP um protocolo útil para bastantes aplicações de mensagens instantâneas e relevantes no âmbito da IoT. O protocolo corre numa variedade de plataformas baseadas na internet e permite ainda a adição de novas aplicações sobre os protocolos principais já existentes [47].

2.4.10 AMQP

O *Advanced Message Queuing Protocol* (AMQP) é um protocolo da camada de aplicação desenvolvido em 2006. O desenvolvimento do AMQP foi feito com um foco na interoperabilidade, estabilidade e segurança em diferentes plataformas. De forma semelhante ao MQTT, possui três níveis de QoS para garantir estabilidade na transmissão de mensagens, e utiliza o protocolo TCP para o transporte das mesmas. Utiliza também *Transport Layer Security* (TLS) para a encriptação de mensagens e *Simple Authentication and Security Layer* (SASL) para a autenticação. A sua arquitetura é baseada no modelo *publish/subscribe*, com a adição de filas de mensagens que são enviadas com base nas respetivas prioridades [46]. Esta arquitetura está representada na Figura 2.19.

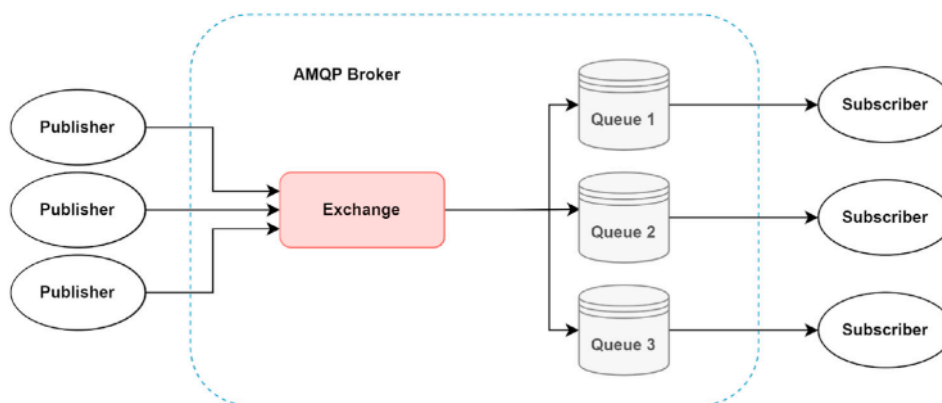


Figura 2.19: Arquitetura do AMQP [46].

2.4.11 HTTP

O HTTP é o modelo cliente-servidor principal usado na *web*, e um dos mais compatíveis com a estrutura de redes existente atualmente. Atualmente, a versão mais comum deste protocolo é o HTTP/1.1. A comunicação entre o cliente e o servidor ocorre através do modelo de mensagens *request/response*. Devido ao sucesso recente da associação entre o HTTP e o REST, tem havido um esforço no sentido de levar esta arquitetura para os sistemas baseados em IoT. Desta forma, os dispositivos podem facilmente atualizar as suas informações com recurso aos métodos HTTP GET,

POST, PUT e DELETE. A apresentação dos dados é arbitrária, sendo as formas mais comuns através de *JavaScript Object Notation* (JSON) e *Extensible Markup Language* (XML). No que diz respeito ao protocolo de transporte usado, o HTTP usa o TCP. Já em relação ao mecanismo de segurança utiliza o TLS, de forma a encriptar o canal de comunicação [48].

2.4.12 Comparação das Diferentes Tecnologias

Depois de estudadas algumas das opções disponíveis para a implementação de uma rede de comunicação num sistema IoT, é importante comparar as mesmas no sentido de encontrar a que se adequa melhor para a solução proposta. No que toca à comunicação entre os sensores IoT e a *gateway*, as principais características dos protocolos estudados estão resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Comparação dos diferentes protocolos de comunicação entre sensores e *gateway* [40].

Protocolo	Alcance	Frequência	Largura de Banda	Taxa de Transmissão
WiFi	até 1 km	Bandas Não Licenciadas sub-1 GHz	1 ou 2 MHz	7 Gbps
ZigBee	100 m	2.4 GHz	2 MHz	250 kbps
LoRa	5 km (urbano), 20 km (rural)	Bandas ISM Não Licenciadas	125 kHz e 250 kHz	50 kbps
SigFox	10km (urbano), 50km (rural)	Bandas ISM Não Licenciadas	100 Hz	100 bps
LTE-M	10 km	Bandas LTE Licenciadas	1.4 MHz	1 Mbps
NB-IoT	1 km (urbano), 10 km (rural)	Bandas LTE Licenciadas	200 kHz	250 kbps

Da Tabela 2.3 é possível concluir que o SigFox é a tecnologia com maior alcance, com 50 km de alcance em meio rural. Já no que toca à largura de banda, o WiFi e o ZigBee destacam-se das demais tecnologias com 2 MHz de largura de banda. Por último, destaca-se também a taxa de transmissão elevada do WiFi, quando comparado com as restantes tecnologias de comunicação.

Já em relação às tecnologias de comunicação entre a *gateway* e a *cloud*, é importante ter em atenção alguns parâmetros que serão importantes na implementação do sistema IoT. As características mais relevantes deste tipo de comunicação estão resumidas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Comparação dos diferentes protocolos de comunicação entre a *gateway* e a *cloud* [46][48].

Protocolo	Protocolo de Transporte	Arquitetura	Modelo de Transmissão	Segurança
MQTT	TCP	Cliente/ <i>Broker</i>	<i>publish/ subscribe</i>	TLS/SSL
CoAP	UDP	Cliente/ Servidor	<i>request/ response</i>	DTLS, SSL
XMPP	TCP	Cliente/ Servidor	<i>publish/ subscribe</i>	TLS
AMQP	TCP	Cliente/ <i>Broker</i>	<i>request/ response</i>	TLS/SSL, SASL
HTTP	TCP	Cliente/ Servidor	<i>request/ response</i>	TLS

Na Tabela 2.4 é possível observar que todas as tecnologias para comunicação entre a *gateway* e a *cloud* utilizam o TCP como protocolo de transporte, à exceção do CoAP. Quanto à arquitetura, o MQTT e AMQP utilizam cliente/*broker*, enquanto que o CoAP, o XMPP e o HTTP utilizam cliente/servidor. Atualmente, o MQTT apresenta-se como um protocolo sólido para o desenvolvimento de aplicações IoT que requerem um ambiente de comunicação seguro e a possibilidade de enviar mensagens para vários *subscribers* em simultâneo, uma vez que uma das grandes vantagens deste protocolo é a transmissão de uma mensagem para vários *subscribers* com desempenho máximo.

2.5 Casos de Estudo

Depois do estudo efetuado sobre estações meteorológicas, dos seus sensores constituintes e dos protocolos de comunicação usados nestes sistemas, é agora explorada a parte prática destas estações, através da análise de casos de estudo. Através do estudo de situações de aplicação reais destes sistemas, é possível observar melhor o contributo e os desafios colocados pelas estações meteorológicas.

2.5.1 Protótipo de uma Estação meteorológica com Recurso a LoRa

Este trabalho teve como objetivo a implementação de uma estação meteorológica com uma infraestrutura sem fios baseada em LoRa. Assim, foram medidos os parâmetros meteorológicos temperatura, humidade, pressão atmosférica, precipitação e velocidade do vento. Para a implementação deste projeto foram usados um Arduino UNO, um sensor DHT11, um sensor de precipitação, um anemómetro, um sensor

BMP180, um *shield* LoRa e uma *gateway* LoRa [49]. A arquitetura deste sistema está representada na Figura 2.20.

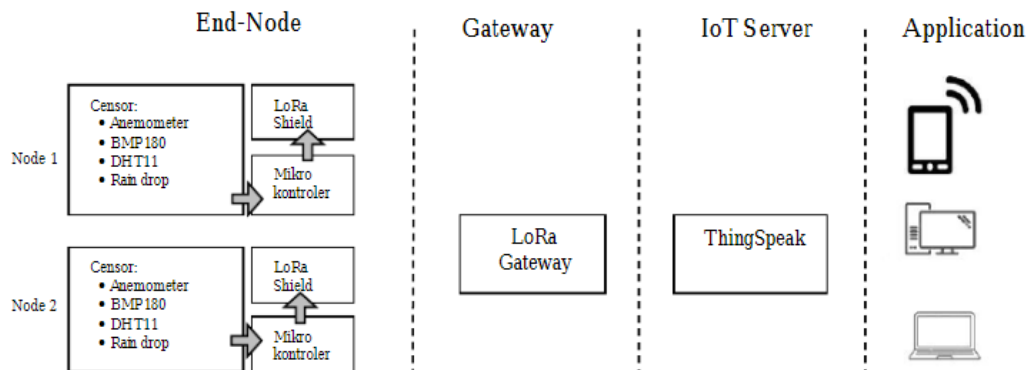


Figura 2.20: Arquitetura do sistema do primeiro caso de estudo [49].

Através da arquitetura apresentada na Figura 2.20 é possível observar que o sistema possui dois módulos iguais. Cada módulo possui um anemómetro, um DHT11, um BMP180, um sensor de precipitação, um microcontrolador e um *shield* LoRa. Os valores recolhidos pelos sensores são tratados pelos respetivos microcontroladores e enviados para um servidor através de uma *gateway* LoRa, para serem posteriormente apresentados na interface do utilizador [49]. Como resultados, foram apresentados os valores recebidos na porta série do Arduino UNO antes de serem convertidos nas respetivas grandezas físicas. Estes valores estão disponíveis na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Resultados obtidos no primeiro caso de estudo [49].

Parâmetro	Módulo 1	Módulo 2
Temperatura	30	27
Humidade	64	65
Precipitação	5	-
Anemómetro	3	-
Pressão	1012	-

2.5.2 Estação meteorológica *Wireles* Baseada em Arduino

Neste projeto foi proposta a implementação de uma estação meteorológica que mede os parâmetros meteorológicos em tempo real e que possui uma comunicação sem fios através do protocolo ZigBee. Foram medidos os valores de temperatura, pressão, humidade e velocidade do vento com recurso aos sensores BMP085 (temperatura e pressão), SHT21 (humidade) e um anemómetro (velocidade do vento).

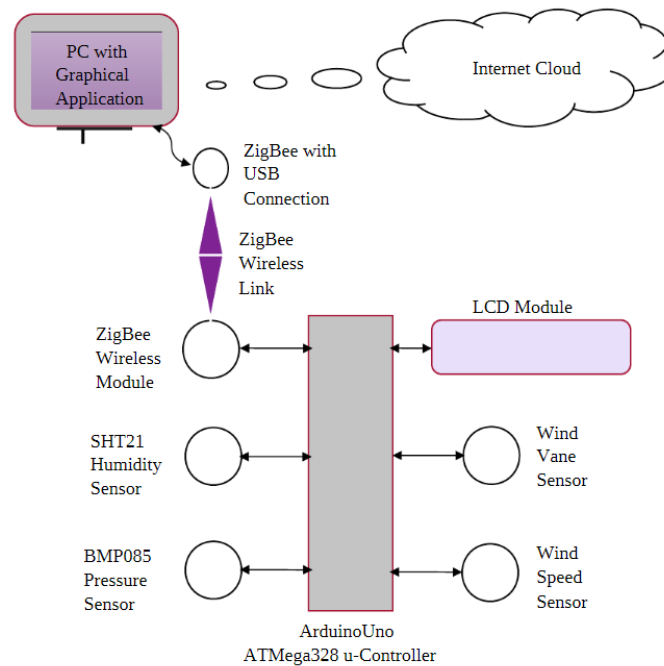


Figura 2.21: Arquitetura do sistema do segundo caso de estudo [50].

Como se observa na Figura 2.21, este sistema possui um Arduino como unidade de processamento central que trata todos os valores recebidos pelos sensores. A este Arduino está também ligado um módulo *Liquid Crystal Display* (LCD) que apresenta os valores lidos pelos sensores. O sistema possui também um módulo *ZigBee wireless* que comunica com um módulo *ZigBee Universal Serial Bus* (USB) ligado ao computador, com o objetivo de enviar as informações recolhidas para a *cloud*. Como resultados, foram apresentados em gráficos os valores medidos pelos sensores. A título de exemplo, a Figura 2.22 representa a variação da temperatura lida pelo respetivo sensor de temperatura, ao longo do tempo, enquanto a Figura 2.23 demonstra a interface de utilizador desenvolvida, com recurso à ferramenta LabView, para apresentar os valores lidos.

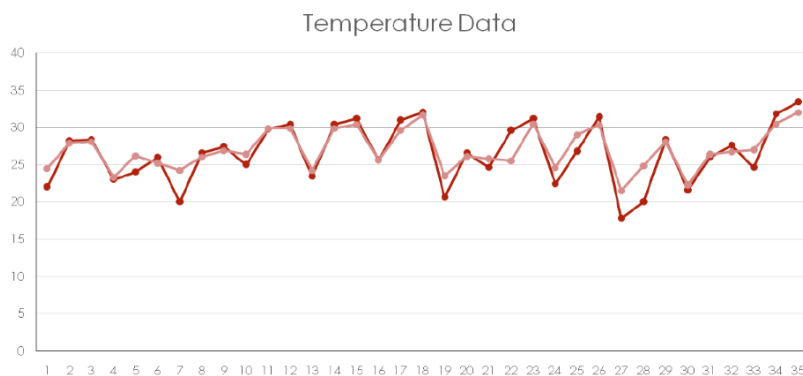


Figura 2.22: Variação da temperatura em função do tempo [50].

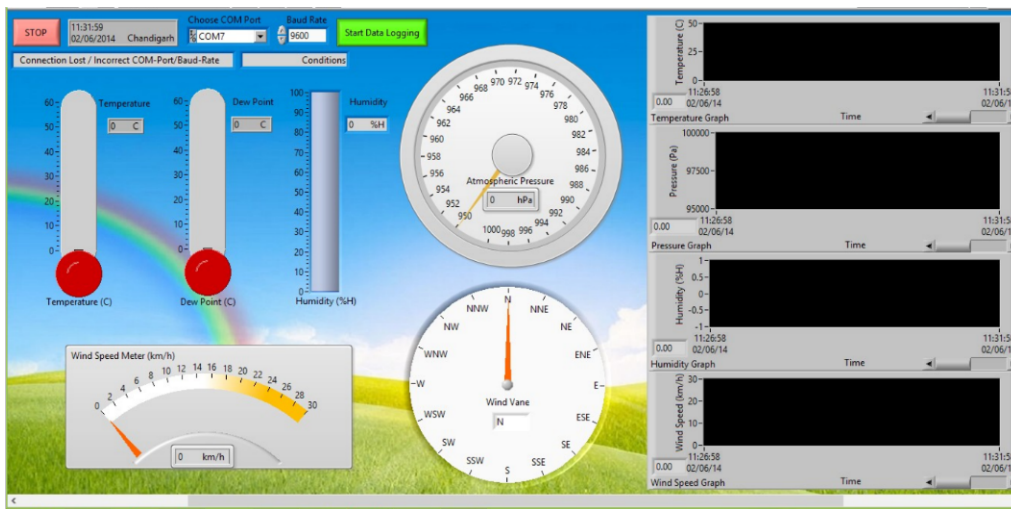


Figura 2.23: Interface gráfica desenvolvida no segundo caso de estudo [50].

2.6 Resumo do Capítulo 2

Neste segundo capítulo da dissertação foram analisados os temas principais associados às estações meteorológicas. Depois de introduzidos os conceitos de IoT e de cidades inteligentes, partiu-se para o estudo particular das estações meteorológicas e das tecnologias relacionadas com as mesmas, particularmente das tecnologias de comunicação de que estas tiram partido. Depois desta análise e da comparação entre as várias tecnologias, pode-se concluir que o LoRa apresenta-se, ao nível de comunicação entre os sensores e a *gateway*, como o protocolo ideal para o projeto a desenvolver devido às suas características interessantes, nomeadamente o alcance e baixo consumo energético. Já para a comunicação entre a *gateway* e a *cloud*, o MQTT destaca-se pelo seu desempenho e facilidade de implementação, sobretudo devido à documentação e suporte atualmente existentes na internet.

Capítulo 3

Arquitetura do Sistema

Este terceiro capítulo do relatório tem como principal objetivo o estudo das tecnologias a utilizar neste projeto. Para tal, serão analisados diversos tipos de sensores e microcontroladores, com o intuito de se perceber quais os componentes que melhor se adequam a este trabalho. Por último, será também feita uma análise ao custo total do projeto, tendo em conta os componentes selecionados.

Depois de estudadas as principais tecnologias relacionadas com estações meteorológicas, foi projetado um sistema com a arquitetura geral representada na Figura 3.1. Este sistema tem como principal objetivo a implementação de uma estação meteorológica comum que permita a medição e recolha dos mais variados parâmetros meteorológicos. A arquitetura do sistema pode ser dividida em quatro módulos, sendo que três deles serão módulos secundários que serão responsáveis pela recolha de informação e pela transmissão da mesma ao quarto módulo. A comunicação entre os módulos secundários e o quarto módulo será feita com recurso à rede de comunicação LoRa através de módulos de rádio LoRa, uma vez que o seu baixo consumo e alcance médio/elevado se adequam a este projeto. O quarto módulo será considerado o módulo principal e tem como principal função o envio dos dados para a interface do utilizador através da rede WiFi, utilizando o protocolo MQTT, funcionando assim como uma *gateway*. Para alcançar este objetivo proposto, existem várias opções distintas que se podem tomar. Nesse sentido, serão agora estudados os possíveis caminhos a seguir, no que diz respeito à escolha de sensores, de microcontroladores, de componentes e de módulos diferentes atualmente existentes no mercado que satisfazem as condições desejadas.

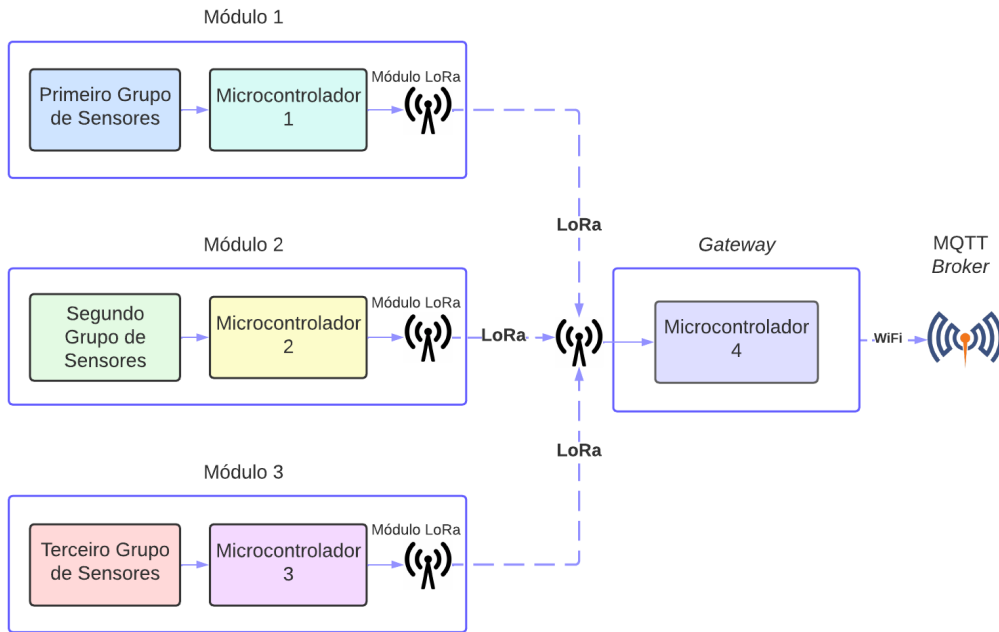


Figura 3.1: Arquitetura geral do sistema.

3.1 Arquitetura dos Módulos Secundários

Como já foi referido, os módulos secundários têm como função recolher os valores dos parâmetros meteorológicos. Assim, definiu-se que o primeiro módulo será responsável pela recolha dos valores de temperatura, humidade e pressão atmosféricas, como se observa pela Figura 3.2.

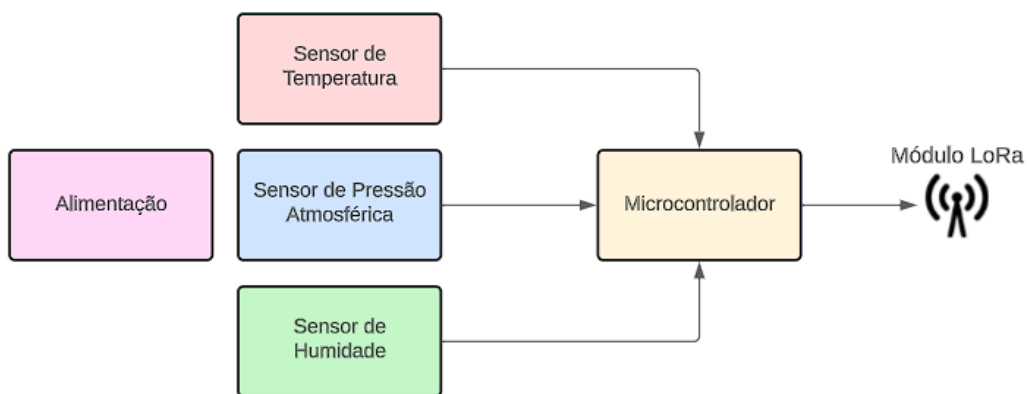


Figura 3.2: Arquitetura do primeiro módulo secundário.

No que toca à medição da temperatura, destacam-se os sensores analógicos representados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características de alguns sensores de temperatura [51][52].

Características	TMP36	LM335Z
Tensão de alimentação	2.7 V a 5.5 V	2.7 V a 5.5 V
Temperatura de operação	-40 °C a +125 °C	-40 °C a +100 °C
Precisão	±2 °C	±2 °C
Tipo de sensor	Analógico	Analógico

Como se observa pela Tabela 3.1, os sensores podem ser considerados relativamente semelhantes, sendo que a principal diferença está relacionada com a maior gama de operação dos sensor TMP36. Para além das principais características destes sensores, foi também feita uma análise ao preço e disponibilidade dos mesmos nos principais fornecedores deste tipo de material.

Tabela 3.2: Preço dos sensores de temperatura referidos [53][54][55][56][57].

Fornecedor	TMP36	LM335Z
Mouser	4,62 €	1,00 €
PTRobotics	3,38 €	3,69 €
Botnroll	2,80 €	Indisponível
Digikey	3,09 €	0,74 €
Farnell	2,76 €	Indisponível

Da análise à Tabela 3.2 conclui-se que o sensor de temperatura LM335Z pode ser adquirido com um custo mais baixo comparado com o sensor TMP36, isto com base apenas nos fornecedores indicados na Tabela 3.2. Outro parâmetro a medir por este primeiro módulo secundário era a pressão atmosférica. Para tal, foram considerados três sensores que permitem medir a pressão atmosférica fabricados pela Bosch, cujas características se encontram representadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Características dos sensores de pressão atmosférica considerados [58][59][60].

Características	BMP180	BMP280	BME280
Tensão de alimentação	1.8 V a 3.6 V	1.71 V a 3.6 V	1.71 V a 3.6 V
Temperatura de operação	-40 °C a +85 °C	-40 °C a +85 °C	-40 °C a +85 °C
Gama de medição	300 a 1100 hPa	300 a 1100 hPa	300 a 1100 hPa
Precisão	±1 hPa	±1 hPa	±1 hPa
Tipo de comunicação	I2C	I2C e SPI	I2C e SPI

Através da análise da Tabela 3.3 verifica-se que os sensores são bastante semelhantes no que toca às suas características, no entanto, estes podem ser utilizados para aplicações diferentes. Enquanto que os sensores BMP180 e BMP280 possibilitam a leitura da temperatura e da pressão, o sensor BME280 permite adicionalmente efetuar a leitura da humidade. De forma semelhante aos sensores de temperatura anteriormente descritos, foi também feita uma pesquisa dos preços e disponibilidade no mercado dos sensores que permitem medir a pressão atmosférica.

Tabela 3.4: Preço dos sensores de pressão referidos [53][54][55][56][57].

Fornecedor	BMP180	BMP280	BME280
Mouser	Indisponível €	Indisponível €	6,04 €
PTRobotics	5,54 €	12,18 €	10,82 €
Botnroll	9,95 €	4,90 €	26,60 €
Digikey	Indisponível	Indisponível €	5,86 €
Farnell	Indisponível	5,43 €	14,89 €

A Tabela 3.4 permite concluir que embora o sensor BME280 permita efetuar a leitura das grandezas temperatura, humidade e pressão atmosférica, este não se apresenta como uma solução económica para a realização dessas tarefas. Como tal, optou-se por escolher o sensor BMP280 para a aquisição do valor da pressão atmosférica.

Uma vez que não existem muitos sensores que permitam fazer a leitura da humidade separadamente, decidiu-se analisar sensores que permitam efetuar a leitura da humidade e da temperatura, em detrimento da utilização de um sensor que recolha exclusivamente os valores de temperatura e de outro que recolha unicamente os valores de humidade. Dos sensores que permitem ler ambas as grandezas, destacam-se os apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Características dos sensores de temperatura e humidade atmosférica considerados [61][62][63][64].

Característica	DHT11	DHT22	HDC1080	HTS221
Tensão de alimentação	3 V a 5.5 V	3.3 V a 5.5 V	2.7 V a 5.5 V	1.7 V a 3.6 V
Gama de medição de temperatura	0 °C a +50 °C	-40 °C a +80 °C	-40 °C a +125 °C	-40 °C a +120 °C
Gama de medição da humidade	20% a 90%	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%
Precisão de temperatura	±2 °C	±0.5 °C	±0.2 °C	±0.5 °C
Precisão de humidade	±5%	±2%	±2%	±3.5%
Tipo de comunicação	One-Wire	One-wire	I2C	I2C e SPI

Da Tabela 3.5 destaca-se a elevada precisão do sensor HDC1080 nas medições da temperatura e da humidade, assim como as elevadas gamas de medição do mesmo. De seguida são apresentados os preços destes sensores praticados por alguns fornecedores nacionais e internacionais.

Tabela 3.6: Preço dos sensores de temperatura e humidade selecionados [53][54][55][56][57].

Fornecedor	DHT11	DHT22	HDC1080	HTS221
Mouser	6,11 €	5,55 €	3,90 €	9,35 €
PTRobotics	3,81 €	6,21 €	Indisponível	Indisponível
Botnroll	3,90 €	5,90 €	Indisponível	Indisponível
Digikey	4,57 €	Indisponível	3,36 €	4,89 €
Farnell	5,98 €	7,64 €	2,54 €	Indisponível

Para além das suas características ideais para este projeto, o sensor HDC1080 apresenta-se também como um dos sensores mais baratos no mercado, quando comparado com sensores que desempenham as mesmas funções, de acordo com a Tabela 3.6. Assim, decidiu-se utilizar o sensor HDC1080 para efetuar a medição da temperatura e da humidade. Já em relação à medição da pressão atmosférica, optou-se pelo sensor BMP280 porque é uma solução mais barata do que o sensor BME280 e produz melhores resultados do que o sensor BMP180.

Para o segundo módulo secundário foram atribuídas as medições da intensidade de luz solar e da quantidade de radiação Ultravioleta (UV), como está ilustrado na Figura 3.3.

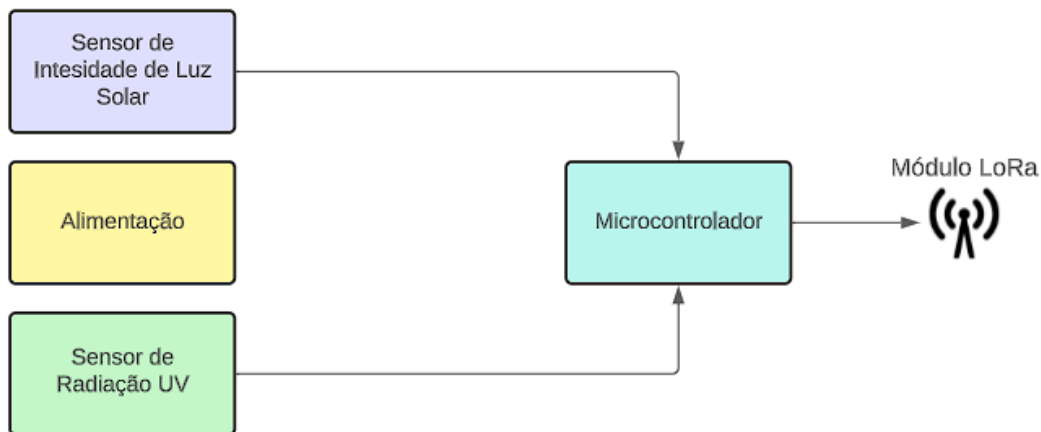


Figura 3.3: Arquitetura do segundo módulo secundário.

Para a medição da radiação UV emitida, foram considerados dois sensores, cujas principais características se encontram listadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Algumas características dos sensores de radiação UV considerados [65][66].

Características	GUVA-S12SD	UVM-30
Tensão de alimentação	2.5 V a 5 V	3 V a 5 V
Temperatura de operação	-40 °C a +85 °C	-20 °C a +85 °C
Gama de medição	240 nm a 370 nm	200 nm a 370 nm
Protocolo de comunicação	Analógico	I2C

Da Tabela 3.7 verifica-se que os sensores são relativamente semelhantes na maioria das suas características, diferindo principalmente no tipo de sensor, uma vez que o sensor GUVA-S12SD é um sensor analógico, enquanto que o UVM-30 é um sensor digital que utiliza o protocolo de comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Já em relação aos preços dos sensores praticados por alguns fabricantes, a informação recolhida está apresentada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Preço dos sensores de radiação UV considerados [53][54][55][56][57].

Fornecedor	GUVA-S12SD	UVM-30
Mouser	5,85 €	Indisponível
PTRobotics	8,49 €	16,24 €
Botnroll	8,90 €	15,80 €
Digikey	6,36 €	Indisponível
Farnell	Indisponível	Indisponível

Da análise da Tabela 3.8, verifica-se que o sensor GUVA-S12SD é consideravelmente mais barato do que o sensor UVM-30, para além de se encontrar disponível em *stock* em mais fabricantes. Por estas razões, foi selecionado o sensor GUVA-S12SD para este projeto. Para medir o outro parâmetro associado a este terceiro módulo, a intensidade solar, foram também considerados dois sensores, cujas características principais estão listadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Características principais dos sensores de intensidade luminosa [67][68][69].

Características	BH1750	LTR-329
Tensão de alimentação	2.4 V a 3.6 V	1.7 V a 3.6 V
Temperatura de operação	-40 °C a +85 °C	-30 °C a +70 °C
Gama de medição	0 a 65535 lux	0 a 65535 lux
Resolução	±1 lux	±0.01 lux
Protocolo de comunicação	I2C	I2C

Da Tabela 3.9 verifica-se que os sensores apresentam uma gama de medição igual, assim como o tipo de comunicação que utilizam, diferindo principalmente na resolução das medições que efetuam. À semelhança dos sensores anteriores, foi também feita uma análise ao custo dos mesmos em alguns fornecedores.

Tabela 3.10: Preço dos sensores de intensidade luminosa analisados [53][54][55][56][57].

Fornecedor	BH1750	LTR-329
Mouser	4,05 €	12,20 €
PTRobotics	3,20 €	Indisponível
Botnroll	3,40 €	Indisponível
Digikey	4,11 €	4,11 €
Farnell	4,74 €	Indisponível

Através da análise da Tabela 3.10 verifica-se que o sensor BH1750 é mais barato quando comparado com o sensor LTR-329, para além de estar disponível mais frequentemente. Como tal, foi selecionado o sensor BH1750 para medir a intensidade luminosa neste projeto.

Por último, decidiu-se que o terceiro módulo secundário terá como funções a medição da velocidade do vento e da quantidade de precipitação, como é possível observar na Figura 3.4.

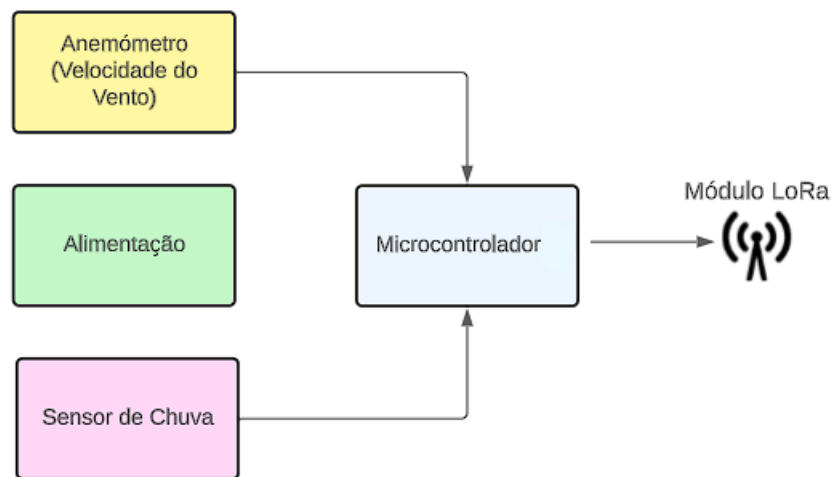


Figura 3.4: Arquitetura do terceiro módulo secundário.

Para a medição da velocidade do vento foi utilizado um anemômetro, apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Anemômetro utilizado [70].

Este dispositivo possui três discos que são colocados perpendicularmente à direção do vento e produz um determinado valor de tensão em função da velocidade do vento. Os valores de tensão aproximados que são gerados são fornecidos pelo fabricante, e estão representados na Figura 3.6.

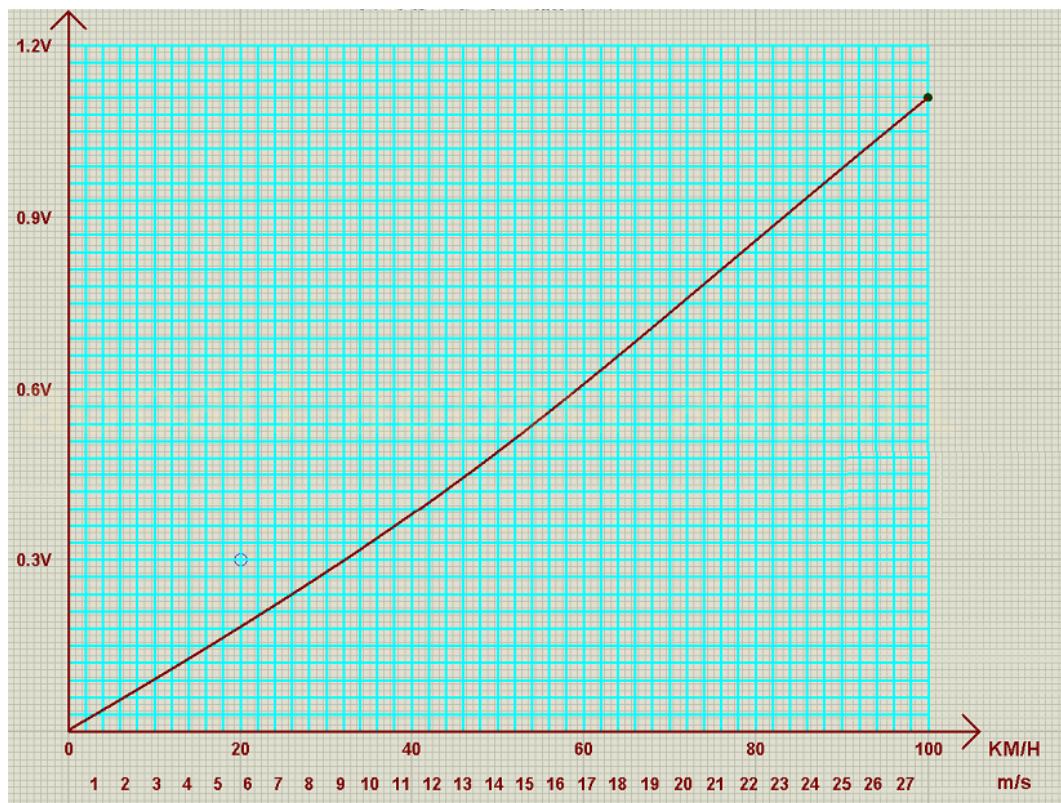


Figura 3.6: Curva da tensão gerada em função da velocidade do vento [70].

Como se observa pela Figura 3.6, num intervalo de valores de velocidade do vento de até 100 km/h, o valor de tensão gerado pelo anemómetro é inferior a 1.2 V. Para além deste gráfico, o fabricante fornece também algumas informações adicionais, descritas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Informações do anemómetro fornecidas pelo fabricante [70].

Característica	Anemómetro
Tensão de saída	0 VDC a 1.2 VDC
Diâmetro dos discos	60 mm
Tolerância de medição	10%
Comprimento dos cabos	3 m

Das informações fornecidas confirma-se o intervalo de medição de até 1.2 V. O anemómetro possui ainda dois cabos que fazem a ligação ao microcontrolador, sendo que um cabo é o de sinal e o outro é o *ground*.

Para além de um sensor que mede a velocidade do vento, este segundo módulo secundário possui também um pluviómetro, que tem como objetivo medir a quantidade de precipitação. Nesse sentido, optou-se pela utilização do pluviómetro WH-SP-RG, ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Pluviômetro WH-SP-RG [71].

Este pluviômetro segue o mecanismo comum deste tipo de sensores de precipitação apresentado no capítulo 2, onde possui um sistema de balde basculante. Este balde bascula e solta a água acumulada sempre que esta atinge um determinado valor que, no caso do pluviômetro WH-SP-RG, é de 0.3537 mm, o que permite determinar a quantidade de precipitação.

Depois de analisados os sensores a utilizar nos módulos secundários para efetuar a leitura dos parâmetros atmosféricos, parte-se agora para o estudo dos microcontroladores a utilizar nestes mesmos módulos. A utilização de um microcontrolador em cada módulo é essencial para o bom funcionamento do projeto, uma vez que estes atuam como a principal unidade de inteligência de cada módulo. O microcontrolador terá como função receber as informações dos sensores e fazer o seu respetivo tratamento, antes de as enviar para o módulo principal. Para esta aplicação em específico, serão considerados microcontroladores de baixo consumo, visto que estes módulos devem operar remota e automaticamente. Nesse sentido, começou-se por analisar alguns microcontroladores, com algumas das suas principais características apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Características dos microcontroladores considerados [72][73][74].

Característica	ATmega328P	ATmega168	STM32F103C8T6
Arquitetura	8-bit AVR	8-bit AVR	32-bit ARM Cortex-M3
Tensão de alimentação	2.7 V a 5.5 V	2.7 V a 5.5 V	2 V a 3.6 V
Temperatura de operação	-40 °C a +125 °C	-40 °C a +150 °C	-40 °C a +105 °C
Frequência	Até 20 MHz	Até 20 MHz	Até 72 MHz
Memória RAM	2 KB	1 KB	20 KB ou 64 KB
UART	1	1	Até 3
SPI	1	1	Até 2
I2C	1	Não	Até 2
Número de I/O	23	23	Até 37
Número de pinos	28	28	48 ou 51

Na Tabela 3.12 são apresentados dois microcontroladores produzidos pela agora Microchip Technology Inc., o ATmega328P e o ATmega168, e um produzido pela STMicroelectronics, o STM32F103C8T6. Enquanto que o ATmega328P e o ATmega168 são semelhantes em termos de características, destaca-se o facto do segundo microcontrolador não possuir I2C, o que seria um problema neste projeto, uma vez que alguns dos sensores selecionados utilizam esse protocolo de comunicação. Comparando o ATmega328P com o STM32F103C8T6, verifica-se que o segundo possui maiores capacidades computacionais. No entanto, essa capacidade excede um pouco aquilo que será necessário para este projeto. Por essa razão, e pelo facto de já existir alguma familiarização com o primeiro microcontrolador da Tabela 3.12, optou-se por utilizar o ATmega328P nos módulos secundários deste projeto. Em relação aos preços destes microcontroladores, a pesquisa feita está apresentada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Preço dos microcontroladores analisados para os módulos secundários [53][54][55][56][57].

Fornecedor	ATmega328P	ATmega168	STM32F103C8T6
Mouser	2,60 €	3,63 €	5,99 €
PTRobotics	7,50 €	Indisponível	Indisponível
Botnroll	5,00 €	Indisponível	7,50 €
Digikey	2,52 €	4,26 €	5,86 €
Farnell	2,72 €	2,76 €	7,60 €

Após a análise da Tabela 3.13 verifica-se que o microcontrolador escolhido, o ATmega328P, é o que pode ser adquirido por um preço mais baixo de todos os microcontroladores considerados, para além de estar disponível em *stock* em todos os fornecedores consultados.

3.2 Arquitetura do Módulo Principal

Depois de estudados os sensores e microcontroladores a utilizar nos módulos secundários, serão agora analisados os principais componentes do módulo principal deste projeto, cuja arquitetura se encontra representada na Figura 3.8.

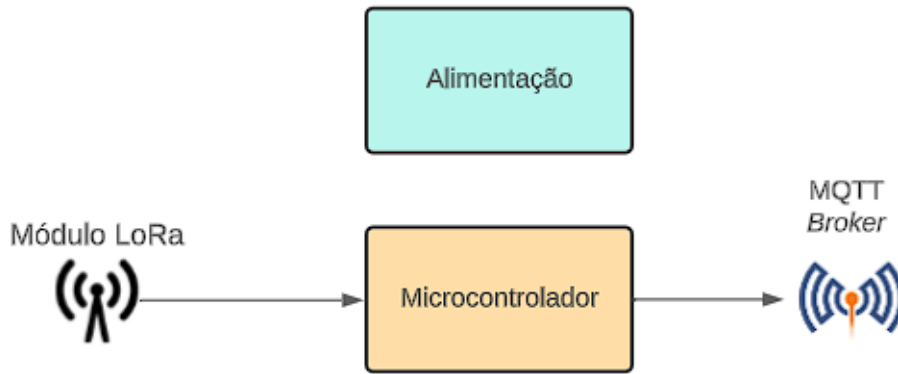


Figura 3.8: Arquitetura do módulo principal.

Como já foi referido, este módulo funcionará como uma *gateway* e terá como função receber os dados dos módulos secundários e enviá-los para a internet. Como tal, será necessária a utilização de um microcontrolador que permita a ligação a uma rede Wi-Fi. Nesse sentido, foram considerados três microcontroladores cujas características se encontram apresentadas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14: Características dos microcontroladores analisados para o módulo principal [75][76][77].

Característica	ESP8266	ESP32	Raspberry Pi Pico W
Microcontrolador	Xtensa Single-Core 32-bit LX106	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6	RP2040
Tensão de alimentação	2.5 V a 3.6 V	2.3 V a 3.6 V	1.8 V a 5.5 V
Frequência do CPU	Até 160 MHz	Até 240 MHz	Até 133 MHz
Wi-Fi Standard	802.11b/g/n	802.11b/g/n	802.11n
Bluetooth	Não	Bluetooth 4.2	Bluetooth 5.2
Memória RAM	50 KB	520 KB	264 KB
UART	2	3	2
SPI	2	4	2
I2C	1	2	2
Número de pinos	30	38	40

Da Tabela 3.14 verifica-se que o ESP8266 e o Raspberry Pi Pico W são relativamente semelhantes no que toca à maioria das suas características, enquanto que o ESP32 se apresenta como o microcontrolador com maior capacidade. Destaca-se também o facto do Raspberry Pi Pico W apenas possui o padrão de Wi-Fi 802.11n, em comparação como os padrões 802.11b/g/n dos dois microcontroladores da Espressif Systems. Em relação aos preços destes microcontroladores no mercado, estes podem ser consultados na Tabela 3.15.

Tabela 3.15: Preço dos microcontroladores analisados para o módulo principal [53][54][55][56][57].

Fornecedor	ESP8266	ESP32	Raspberry Pi Pico W
Mouser	Indisponível	8,10 €	5,40 €
PTRobotics	4,31 €	12,24 €	8,86 €
Botnroll	5,00 €	13,90 €	7,90 €
Digikey	6,85 €	10,85 €	5,48 €
Farnell	6,90 €	8,19 €	6,12 €

Da Tabela 3.15 conclui-se que o ESP32 é, no geral, o microcontrolador que possui o preço de mercado mais elevado, no entanto, uma vez que o mesmo já tinha sido adquirido para trabalhos anteriores, foi este o microcontrolador selecionado para este projeto.

Após analisados os componentes principais dos módulos secundários e do módulo principal, segue-se agora o estudo da comunicação a utilizar entre os mesmos. Como já foi referido, essa comunicação será implementada através da rede LoRa. Para tal, é necessária a utilização de módulos LoRa específicos quer em cada módulo secundário, quer no módulo principal. Nesse sentido, foram analisados dois módulos distintos que permitem a implementação de uma rede LoRa. As características destes módulos encontram-se disponíveis na Tabela 3.16.

Tabela 3.16: Características dos módulos LoRa considerados [78][79].

Característica	RFM95W	RN2903
Fabricante	HopeRF	Microchip
Chip	Semtech SX1276	Semtech SX1272
Banda de frequência	868 MHz (EU), 915 MHz (US, AU, etc.)	915 MHz (US, AU, etc.)
Alcance	Alguns km em áreas rurais, 200 m em áreas urbanas	Alguns km em áreas rurais, 200 m em áreas urbanas
Taxa de dados	Até 300 kbps	Até 300 kbps
Sensibilidade	Até -144 dBm	Até -146 dBm
Interface	SPI	UART, I2C, SPI
Consumo	Baixo	Baixo

Pela Tabela 3.16 verifica-se que os dois módulos são semelhantes em termos de alcance do sinal, da taxa de transmissão de dados e da sua sensibilidade. No entanto, enquanto que o RFM95W pode operar nas bandas de 868 MHz da Europa, o módulo RN2903 apenas pode operar na banda de 915 MHz, bastante comum na América do Norte. Os preços destes dois módulos encontram-se disponíveis na Tabela 3.17.

Tabela 3.17: Preço dos módulos LoRa considerados [53][54][55][56][57].

Fornecedor	RFM95W	RN2903
Mouser	20,24 €	15,62 €
PTRobotics	9,59 €	Indisponível
Botnroll	Indisponível	Indisponível
Digikey	13,42 €	17,48 €
Farnell	17,66 €	17,94 €

Da Tabela 3.17 é possível constar que o módulo RFM95W pode ser adquirido com o custo mais baixo através do fornecedor PTRobotics, pelo que foi o módulo selecionado para este projeto.

Depois de estudados os componentes dos módulos, é também necessário verificar o tipo de alimentação dos mesmos. Uma vez que os módulos secundários e o módulo principal se vão encontrar em locais distintos, serão igualmente necessários dois tipos de alimentação. Enquanto que o módulo principal vai estar localizado dentro de casa, o que pode facilitar a alimentação dos constituintes do mesmo, os módulos secundários estarão localizados fora de casa, pelo que será necessário outro tipo de alimentação. Nesse sentido, optou-se pela utilização de baterias de lítio (Figura 3.9) para cada módulo secundário.



Figura 3.9: Bateria de lítio [80].

3.3 Análise de Custos do Sistema

Depois da análise realizada anteriormente neste capítulo, é agora possível efetuar uma estimativa do custo total deste projeto. Esta estimativa é feita com base nos valores gastos na aquisição dos sensores, microcontroladores e outros componentes a utilizar neste projeto e está representada na Tabela 3.18.

Tabela 3.18: Preço total aproximado do projeto.

Componente	Fornecedor	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
HDC1080	Mouser	1	3,90 €	3,90 €
BMP280	AliExpress	1	1,51 €	1,51 €
Anemómetro	Ebay	1	43,58 €	43,58 €
GUVA-S12SD	AliExpress	1	1,84 €	1,84 €
WH-SP-RG	AliExpress	1	12,69 €	12,69 €
BH1750	Mouser	1	4,05 €	4,05 €
ATmega328P	Digikey	3	2,52 €	7,56 €
ESP32	Botnroll	1	13,90 €	13,90 €
RFM95W	Botnroll	4	9,59 €	38,36 €
Bateria de lítio	Eletrofun	6	5,92 €	35,52 €
Total				162,91 €

A análise da Tabela 3.18 permite concluir que o preço aproximado deste projeto é de cerca de 162,91 €. No entanto, é importante salientar dois fatores. Primeiro, foram desprezados os valores de alguns componentes utilizados como, por exemplo, resistências, condensadores, cabos de ligação, etc. Depois, é também necessário ter em conta que alguns dos componentes da Tabela 3.18 não precisaram de ser comprados, uma vez que já se encontravam disponíveis por terem sido utilizados noutros projetos anteriores.

3.4 Resumo do Capítulo 3

Neste terceiro capítulo do relatório foi feito um estudo da arquitetura do sistema a desenvolver. Começou-se por analisar os módulos secundários, onde foi feita uma pesquisa das diversas opções existentes no mercado para atingir os objetivos propostos, quer a nível de sensores, quer a nível dos microcontroladores. Depois, o mesmo estudo foi feito para o módulo principal, com a intenção de entender que tecnologias melhor se adequavam para este projeto. A comunicação entre os módulos foi também abordada, através da análise dos diferentes dispositivos que permitem implementar um rede LoRa. Por último, terminou-se este capítulo com uma estimativa do preço total deste projeto, com base no material selecionado.

Capítulo 4

Implementação do Sistema

Depois de apresentada a arquitetura do sistema de uma forma geral no Capítulo 3 será agora abordada no presente capítulo a implementação do sistema desenvolvido quer a nível de *hardware*, quer a nível de *software*. Para esse efeito, serão analisados esquemas elétricos e fluxogramas referentes às componentes de *hardware* e de *software* do sistema, respetivamente.

4.1 Descrição do *Hardware* dos Módulos Secundários

Como já foi referido anteriormente no presente relatório, os módulos secundários têm como objetivo a medição dos valores dos parâmetros atmosféricos e o envio dos mesmos para o módulo principal. Assim sendo, o conteúdo de cada módulo secundário pode ser resumido a um microcontrolador, a um módulo LoRa e aos sensores de aquisição dos valores. Uma vez que os módulos apresentam uma estrutura semelhante entre si, foi desenvolvido um *Printed Circuit Board* (PCB) que pudesse ser utilizado para a implementação dos diferentes módulos. Este PCB geral desenhado para os módulos secundários está representado no Apêndice B e o resultado do PCB está disponível na Figura 4.1.

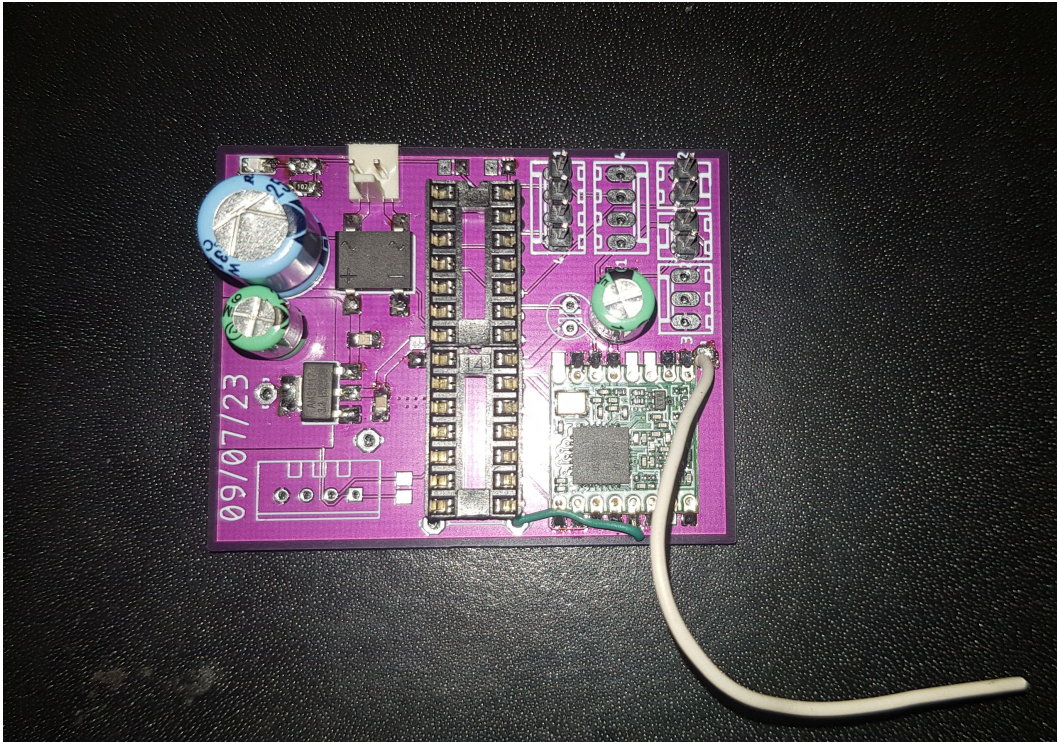


Figura 4.1: PCB dos módulos secundários.

Uma vez que todos os sensores utilizados podem ser alimentados a 3.3 V e que os sensores digitais comunicam com o microcontrolador através do protocolo I2C, que requer uma tensão de 3.3 V nas comunicações, optou-se por alimentar os microcontroladores do módulos secundários a 3.3 V, com uma frequência do relógio de 8 MHz. Nesse sentido, implementou-se no PCB o sistema de alimentação apresentado na Figura 4.2.

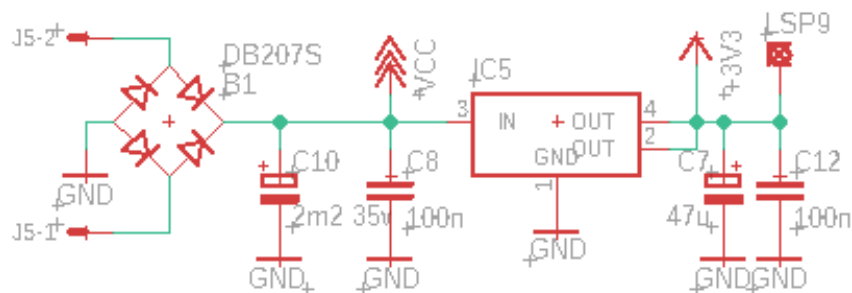


Figura 4.2: Circuito de alimentação dos PCB.

Este circuito começa com uma ponte retificadora para permitir a alimentação da placa com tensão alternada, caso seja necessário. Foram também utilizados condensadores de modo a estabilizar a tensão de entrada e a reduzir o ruído de altas frequências. Entre os condensadores está situado o regulador de tensão AMS1117,

representado na Figura 4.3, que reduz a tensão de entrada de até 15 V para os 3.3 V desejados.

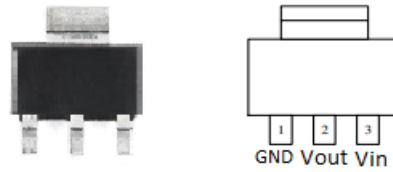


Figura 4.3: *Pin mapping* do regulador de tensão AMS1117 [81].

Todos os módulos secundários possuem também um módulo LoRa RFM95W, apresentado na Figura 4.4, que opera na banda de frequência 868 MHz permitida na Europa.

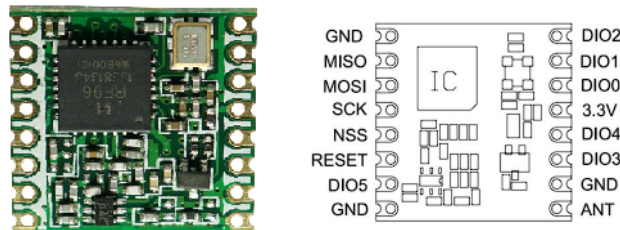


Figura 4.4: *Pin mapping* do módulo LoRa RFM95W [82].

O módulo RFM95W estabelece a comunicação com o microcontrolador através do protocolo de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), um protocolo de comunicação síncrono estabelecido através da ligação de quatro fios (Figura 4.5), usado normalmente em aplicações de curta distância, como a comunicação entre microcontroladores e sensores, cartões SD, entre outros.

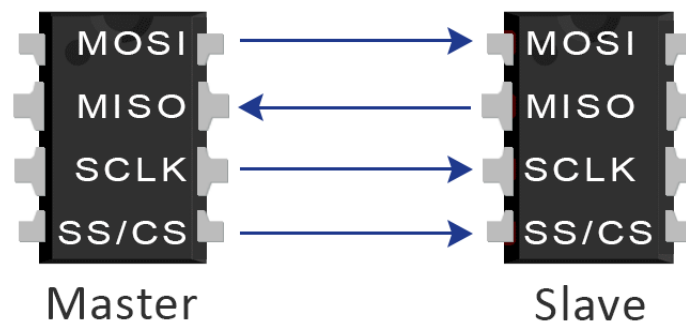


Figura 4.5: Protocolo de comunicação SPI [83].

Para além dos quatro fios de ligação para o SPI (o *Master Output Slave Input* (MOSI), o *Master Input Slave Output* (MISO), o *Serial Clock* (SCK) e o *Slave Select* (SS)), o módulo RFM95W possui ainda seis pinos digitais *Input/Output* (I/O)

usados para interrupções do módulo, detecção de sinal e sincronização da comunicação. De todos os pinos digitais, o pino DIO0 é o que é mais frequentemente utilizado, uma vez que é o pino que indica que o pacote de dados foi recebido e que está pronto a ser processado pelo microcontrolador. Para além dos habituais pinos de alimentação do módulo (3.3 V e GND na Figura 4.4), este módulo possui também o pino ANT destinado à ligação da antena, sem a qual o módulo poderá não funcionar e até mesmo ser danificado. Para a transmissão ocorrer de forma eficiente é também aconselhável que a antena composta por um material condutor como, por exemplo, o cobre (utilizado neste projeto). A antena deverá possuir também um determinado comprimento, que pode ser obtido através do cálculo do comprimento de onda, uma vez que o comprimento típico destas antenas é de um quarto do comprimento de onda do sinal de forma a melhorar a qualidade do sinal. A determinação do valor do comprimento de onda pode ser feita através da equação (4.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.1)$$

Uma vez que a frequência de operação do módulo é de 868 MHz, o valor do comprimento de onda é então determinado na equação (4.2).

$$\lambda = \frac{300000000}{868000000} = 0.3456 \text{ m} \quad (4.2)$$

Visto que se pretende que o comprimento do fio seja de um quarto do comprimento de onda, este é então dividido por quatro, como se observa na equação (4.3).

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0.3456}{4} = 0.0864 \text{ m} \quad (4.3)$$

Feitos os cálculos, conclui-se então que a antena dos módulos RFM95W deve ser de 0.0864 m, ou seja, de 8.64 cm. No que toca às configurações do módulo, o RFM95W permite a escolha de diferentes opções que influenciam a comunicação do mesmo: o *Spreading Factor* (SF), o *Coding Rate* (CR) e a largura de banda. O SF determina o tipo de modulação usado no sinal, o que tem um impacto significativo no alcance da comunicação e na taxa de transmissão dos dados, e varia entre SF7 e SF12. SF7 proporciona uma maior taxa de transmissão de dados, mas um alcance inferior, enquanto que o SF12 permite o inverso. O CR controla a correção de erros e a redundância nos dados transmitidos. Por último, a largura de banda corresponde à largura do canal de transmissão. Quanto maior for a largura de banda maior é a taxa de transmissão e menor é o alcance do sinal.

Os componentes e módulos RFM95W discutidos anteriormente estão presentes em todos os módulos secundários, no entanto, estes diferem entre si no tipo de sensores que possuem, pelo que serão agora analisados os três módulos secundários a nível de *hardware*. O primeiro módulo secundário tem como função a recolha dos valores

de temperatura, de humidade e de pressão atmosférica, para além do envio dos mesmos para o módulo principal. Para tal, foram utilizados os sensores analisados no Capítulo 3: o sensor HDC1080 para a medição da temperatura e da humidade e o sensor BMP280 para a medição do valor de pressão atmosférica. Para se economizar no preço dos PCB optou-se por desenhar um PCB geral que permita as ligações dos sensores todos, sendo depois soldados os conetores necessários para um PCB específico. No caso deste primeiro módulo, foram soldados os conetores para os sensores em questão. Uma vez que ambos os sensores comunicam com o microcontrolador através do protocolo I2C, foram soldados quatro conetores para o estabelecimento da comunicação I2C: 3.3 V, *ground*, *Serial Data* (SDA) e *Serial Clock* (SCL). Na Figura 4.5 está representado o esquema elétrico do primeiro módulo secundário onde é possível observar essencialmente quatro grupos de componentes distintos: o sistema de alimentação, o microcontrolador ATmega328p, o módulo RFM95W e pinos de ligação dos sensores I2C.

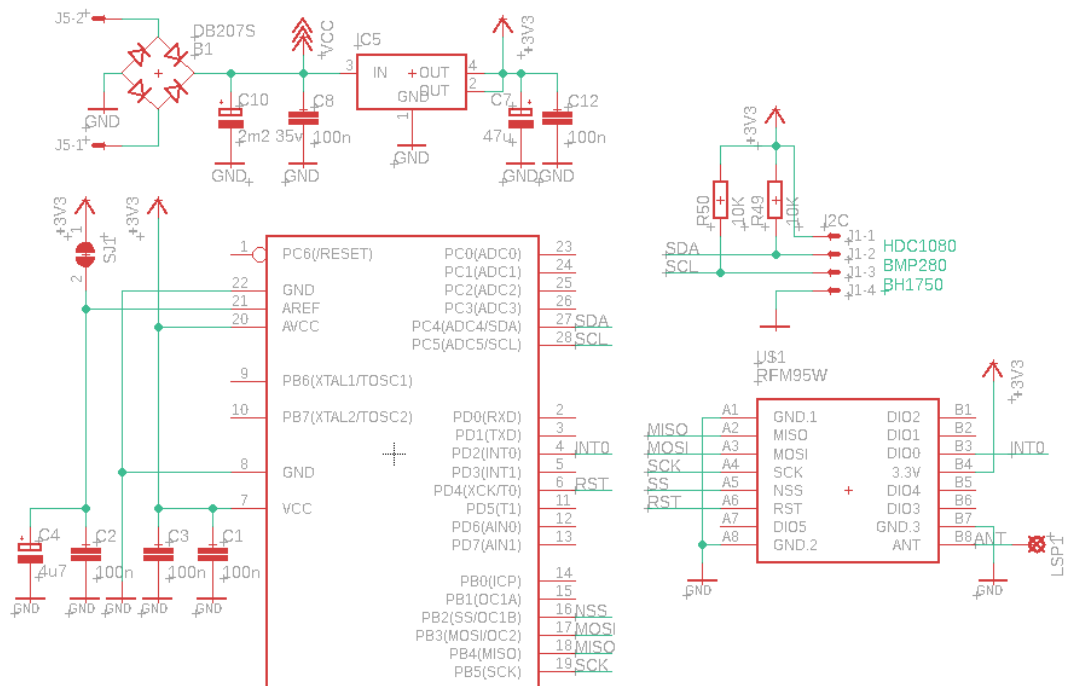


Figura 4.6: Esquema elétrico do primeiro módulo secundário.

Já em relação ao segundo módulo secundário, responsável pela medição da intensidade solar e radiação ultravioleta, foram utilizados os sensores BH1750 e GUA-S12SD, respetivamente. Uma vez que o primeiro sensor é digital e também comunica com o microcontrolador por I2C e o segundo sensor é analógico foi necessário soldar ao PCB dois grupos de conetores separados. O sensor BH1750 foi ligado a quatro pinos de forma semelhante aos sensores I2C do primeiro módulo secundário, enquanto que o sensor analógico GUA-S12SD foi ligado a três pinos: dois para a alimentação e um para a ligação ao *Analog-to-Digital Converter* (ADC) do microcontrolador. De

resto, o esquema elétrico deste segundo módulo secundário mantém-se semelhante ao do primeiro, com as mesmas ligações entre o microcontrolador e o módulo RFM95W e o mesmo circuito de alimentação, como se observa pela Figura 4.7.

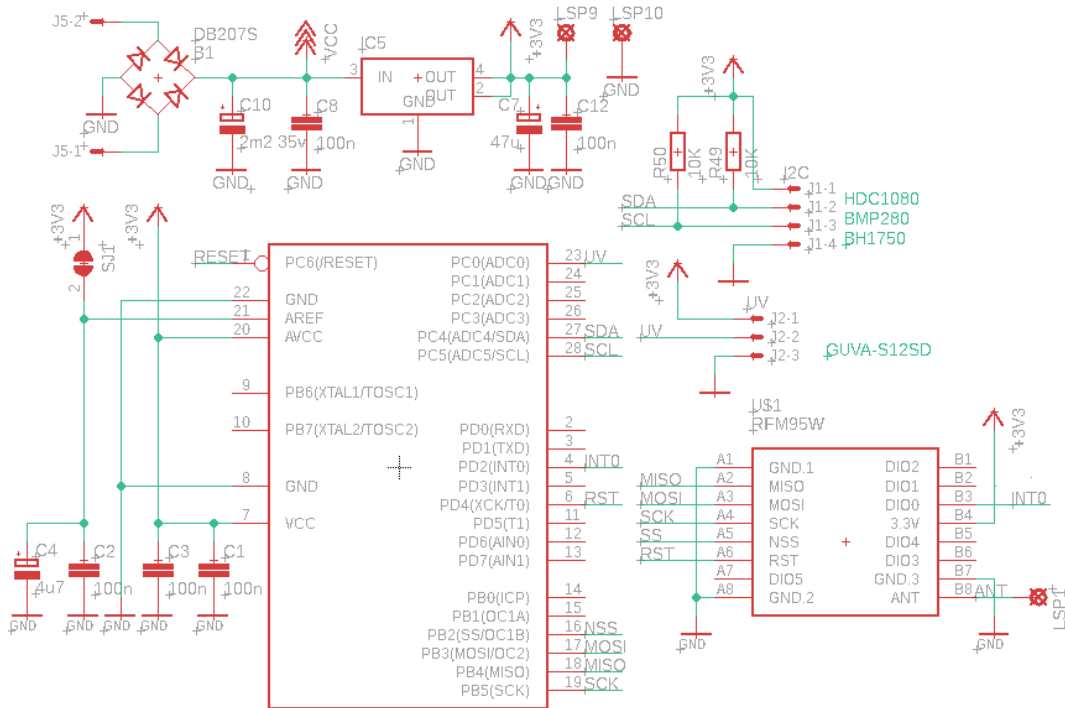


Figura 4.7: Esquema elétrico do segundo módulo secundário.

Por último, o terceiro módulo secundário é composto pelos sensores responsáveis pela medição da velocidade do vento e da quantidade de precipitação. Assim, foram utilizados um anemómetro analógico para medir o primeiro parâmetro e o sensor de precipitação WH-SP-RG para o segundo. Como o anemómetro é um sensor analógico, este foi ligado a um pino do ADC do microcontrolador, de forma semelhante ao sensor de radiação UV. Já o sensor de precipitação gera um impulso digital sempre que este mede uma determinada quantidade de água, pelo que foi ligado a um pino digital do microcontrolador. O esquema elétrico deste terceiro módulo secundário, assim como as ligações descritas, está representado na Figura 4.8.

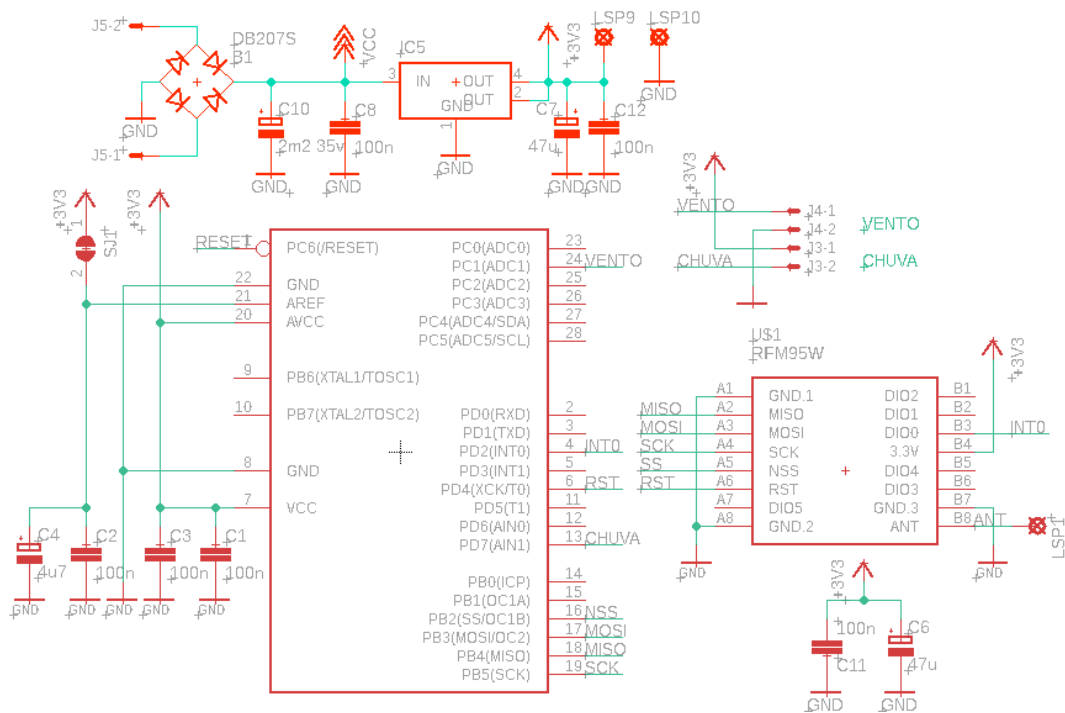


Figura 4.8: Esquema elétrico do terceiro módulo secundário.

4.2 Descrição do Software dos Módulos Secundários

Depois terem sido analisados os módulos secundários no que toca ao seu *hardware*, segue-se agora a descrição dos mesmos a nível de *software*. Esta descrição será feita em relação à programação dos microcontroladores destes módulos, uma vez que estes são a unidade principal de inteligência de cada módulo. Para todos os módulos secundários foi necessário desenvolver um programa que permitisse a leitura dos parâmetros atmosféricos de cada módulo e o envio dos mesmos para o módulo principal através do módulo RFM95W. Numa tentativa de evitar a colisão de mensagens entre os módulos (e de facilitar o tratamento de dados do lado do servidor) e de adicionar um sistema de deteção de erros foram implementadas duas medidas: o envio de um identificador de cada módulo e de um *checksum* aquando do envio das tramas. Assim, em cada mensagem será enviado um identificador do módulo, os valores referentes aos parâmetros atmosféricos e um *checksum*, como se observa na Figura 4.9. Estes componentes da trama são separados pelo caracter ";", que será útil no tratamento de dados no servidor. A identificação dos módulos é feita de acordo com a Tabela 5.1.



Figura 4.9: Composição de uma trama enviada pelos módulos secundários.

Tabela 4.1: Identificação dos módulos secundários.

Módulo	Identificador	Descrição
Primeiro Módulo	M1	Temperatura, humidade e pressão
Segundo Módulo	M2	Intensidade solar e radiação UV
Terceiro Módulo	M3	Velocidade do vento e precipitação

Antes da análise dos códigos desenvolvidos para os módulos secundários é importante estudar as sequências de operação do módulo RFM95W quando transmite ou recebe dados, que são detalhadas no *datasheet* do fabricante. O processo de transmissão de dados está representado na Figura 4.10.

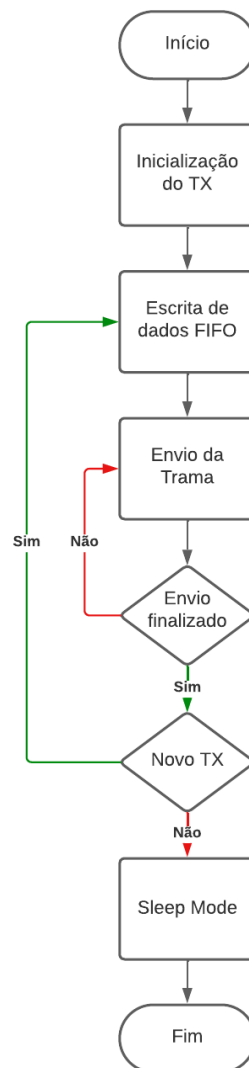


Figura 4.10: Processo de transmissão de dados no módulo RFM95W (adaptado de [78]).

Através da análise da Figura 4.10 verifica-se que o módulo RFM95W começa a transmissão de uma trama com a inicialização do registo TX. De seguida, a trama a transmitir é colocada no registo *First In, First Out* (FIFO), um registo de armazenamento temporário para os dados a transmitir. Os dados são colocados neste registo se forma sequencial, o que significa que o primeiro *byte* escrito no FIFO é o primeiro a ser transmitido. Depois, é iniciado o processo de transmissão da trama, sendo que o seu final é indicado com a ativação de uma interrupção própria denominada *TXDone*, associada ao registo TX. Por último, é verificado se existem mais dados a serem transmitidos. Se existirem, o processo é novamente repetido, enquanto que se não houver mais nada a ter enviado, o módulo entra no estado *Sleep Mode*, um estado de baixo consumo de energia, enquanto aguarda por mais dados a serem transmitidos.

Já em relação ao processo de recepção de dados, este está representado na Figura 4.11.

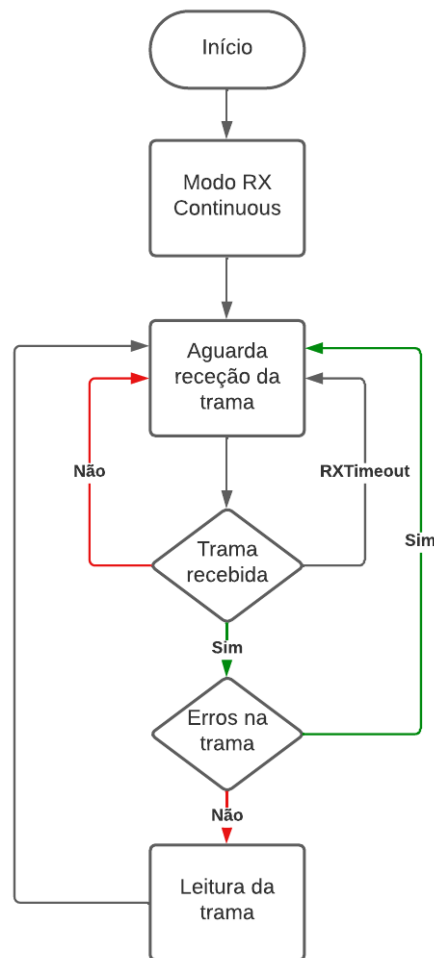


Figura 4.11: Processo de recepção de dados no módulo RFM95W (adaptado de [78]).

Da mesma forma que na transmissão de dados, o módulo começa pela inicialização do registo de recepção de dados (Modo RX). De seguida, o módulo aguarda pela recepção completa da trama, que é sinalizada pela interrupção *RXDone*. Caso a trama não tenha sido completamente recebida ou se o tempo definido para a recepção da trama se tenha esgotado, o módulo aguarda novamente pela recepção de uma trama completa. Depois desta sequência, é verificado se os dados recebidos contêm erros através de um código *Cyclic Redundancy Check* (CRC). Caso não tenham existido erros na transmissão, a trama recebida é armazenada e este processo é novamente repetido para novos dados.

Depois de estudado o modo de funcionamento do módulo RFM95W, será agora analisado os modos de funcionamento dos três módulos secundários. A nível de *software*, o processo de funcionamento dos três modos é semelhante, diferindo na

informação recolhida e enviada, uma vez que os módulos recolhem valores de parâmetros diferentes. O fluxograma do funcionamento do primeiro módulo secundário está representado na Figura 4.12.

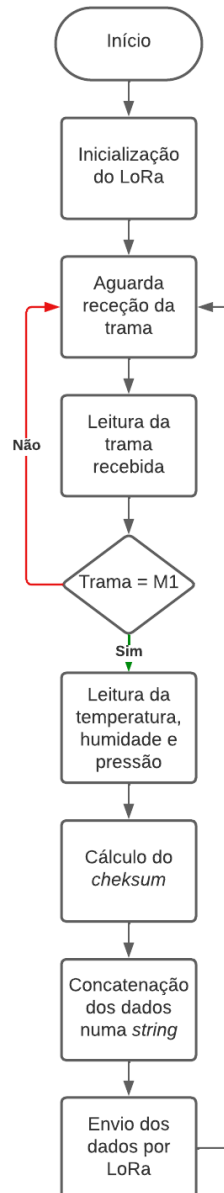


Figura 4.12: Fluxograma do código do primeiro módulo secundário.

Como se observa pelo fluxograma da Figura 4.12 o código começa com a inicialização do módulo LoRa RFM95W. Esta inicialização consiste na definição dos pinos da comunicação LoRa que serão usados como SS, *Reset* (RST) e *Digital Input/Output 0* (DIO0), a interrupção digital do módulo. De seguida, o microcontrolador aguarda constantemente pela receção de uma trama. No caso deste primeiro módulo secundário, o microcontrolador aguarda pela receção do seu identificador "M1",

o que significa que o servidor pediu o envio dos dados referentes a este módulo. Em caso positivo, são lidos os valores da temperatura, da humidade e da pressão atmosféricas através dos sensores definidos para esse efeito. Depois de lidos os valores dos sensores, estes são somados de forma a determinar o valor do *checksum* a ser enviado. Estes valores são depois concatenados numa *string* que será depois enviada por LoRa. Esta *string* será então formada pelo identificador do módulo, seguido dos valores de temperatura, humidade e pressão e do *checksum*, estando todos estes valores separados pelo caracter ";", como já foi referido anteriormente. Já em relação ao código do segundo módulo secundário, o fluxograma do mesmo está representado na Figura 4.13.

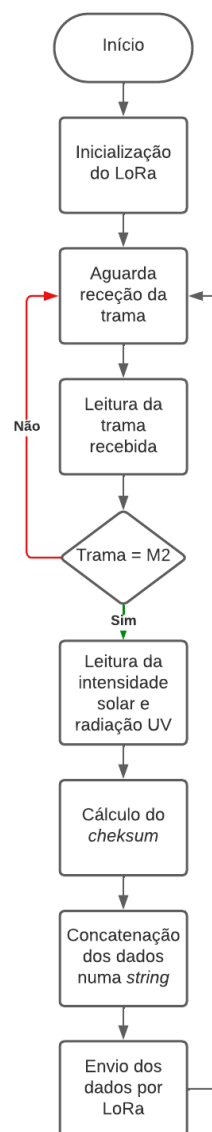


Figura 4.13: Fluxograma do código do segundo módulo secundário.

Através da análise da Figura 4.13 verifica-se que este é semelhante ao do primeiro módulo. Após a inicialização do LoRa, o módulo aguarda pela recepção do seu identificador, neste caso a mensagem "M2". Depois da recepção do identificador, são lidos os valores da intensidade solar e da radiação UV e calculado o *checksum*, antes de serem concatenados numa *string*. Depois deste processo, os dados são enviados para o módulo principal, ficando este módulo a aguardar por uma nova recepção do seu identificador.

Por último, o fluxograma do terceiro módulo secundário está representado na Figura 4.14.

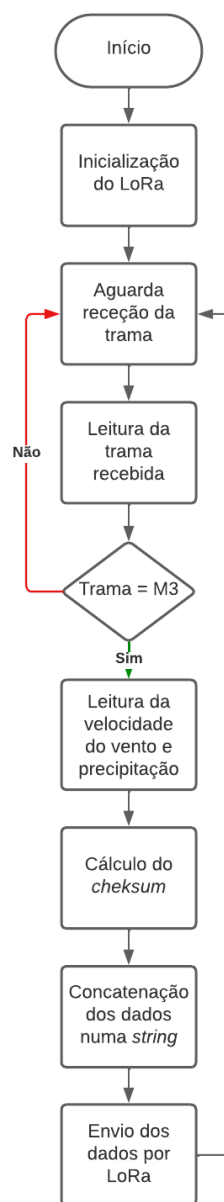


Figura 4.14: Fluxograma do código do terceiro módulo secundário.

Assim como nos dois primeiros módulos, o código começa com a inicialização do RFM96W, passando depois para verificação da existência de uma trama recebida. Caso seja recebido "M3", são lidos os valores da velocidade do vento e da precipitação e calculado o *checksum*. Por último é enviada a *string* concatenada para o módulo principal. Uma vez que o fabricante de onde foi obtido o sensor para a medição da velocidade do vento não forneceu qualquer tipo de *datasheet* e que a informação fornecida foi limitada, foi necessário fazer uma calibração do sensor a partir do gráfico da Figura 3.6. Para tal, foram selecionados alguns pontos do gráfico no sentido de ser fazer uma regressão linear, que fornece um valor a multiplicar pelo valor de tensão lido pelo ADC do microcontrolador. Os pontos selecionados estão representados na Figura 4.15.

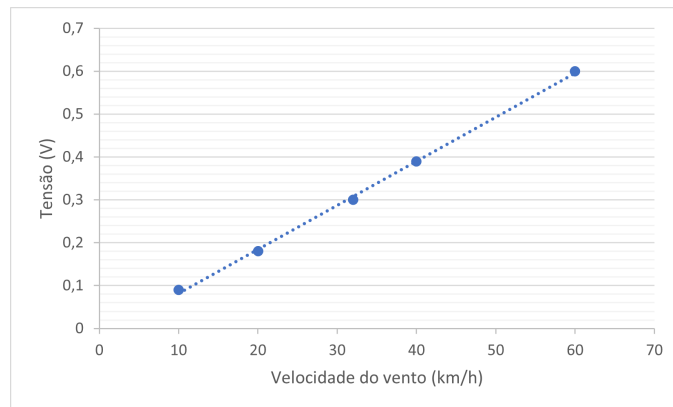


Figura 4.15: Linearização do sensor do vento.

A regressão linear do gráfico da Figura 4.15 resulta na equação (4.4), de onde se conclui que o valor a multiplicar pelo valor de tensão lido pelo microcontrolador é de 0,01023.

$$y = 0,01023x - 0,019572 \quad (4.4)$$

4.3 Descrição do *Hardware* da *Gateway*

No contexto deste projeto, a *gateway* refere-se ao módulo principal já referido que é composto por um ESP32 e por um módulo RFM95W. O objetivo deste módulo é funcionar como uma interligação entre os módulos secundários e o servidor. Essencialmente, o ESP32 recebe o identificador do servidor através do protocolo MQTT e envia-o através do módulo RFM95W. Os módulos secundários recebem o identificador e respondem com os valores pedidos, também pelo módulo RFM95W. Por último, o ESP32 recebe a resposta dos módulos secundários e envia-a para o servidor, novamente utilizando o MQTT. O esquema elétrico deste módulo principal está representado na Figura 4.16.

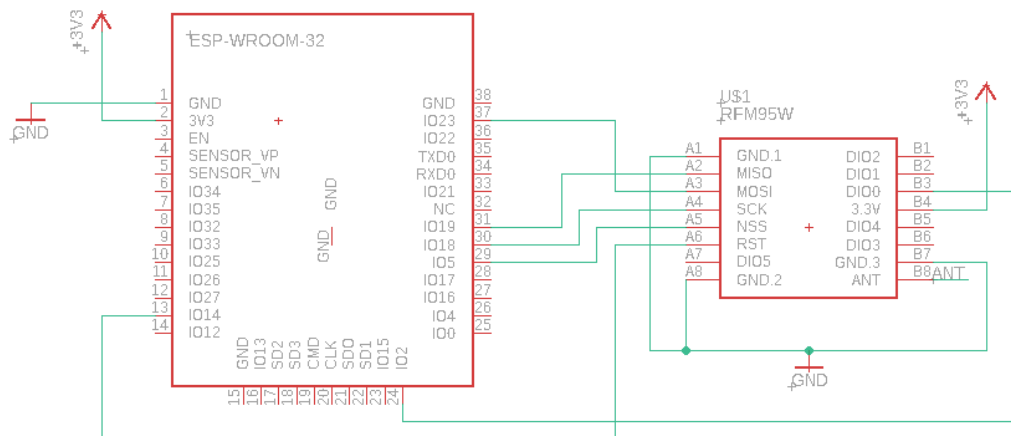


Figura 4.16: Esquema elétrico do módulo principal.

No esquema elétrico da Figura 4.16 verifica-se a ligação do ESP32 ao módulo LoRa RFM95W. Para estabelecer a comunicação entre os dois foi necessária a ligação dos pinos MOSI, MISO e SCK para o funcionamento do SPI, para além dos pinos RST e DIO0. Uma vez que o módulo principal se encontra dentro de casa, não foi necessário nenhum sistema de alimentação especial, visto que este se encontra ligado a um computador. As portas USB do computador fornecem uma tensão de 5 V que é posteriormente reduzida para os 3.3 V, com os quais o ESP32 opera. Esta redução de tensão é feita na própria placa do microcontrolador.

4.4 Descrição do *Software* da *Gateway*

O *software* da *gateway* está relacionado com a programação do microcontrolador do módulo principal, o ESP32. No *software* do módulo principal, existem dois aspetos a ter em conta: a comunicação do ESP32 com os módulos secundários através de LoRa e a comunicação do ESP32 com o servidor através de MQTT. Antes de ser descrito o código desenvolvido para este módulo principal, é importante analisar como se enquadra o protocolo MQTT neste projeto. Como já foi referido na Secção 2.4 do Capítulo 2, o MQTT é um protocolo de transporte de mensagens que se baseia no modelo de transmissão *publish/subscribe*. A gestão das mensagens é feita pelo *broker* MQTT e estas podem ser acedidas através da subscrição de determinados tópicos por parte do servidor e do ESP32. A implementação simplificada do MQTT no contexto deste projeto está representada na Figura 4.17.

Na Figura 4.17 verifica-se que ambos o servidor e o ESP32 subscrevem e publicam mensagens em dois tópicos distintos. O servidor publica no tópico PC_TO_ESP os identificadores dos módulos secundários. O ESP32 subscreve o tópico PC_TO_ESP, de onde retira as mensagens lá colocadas pelo servidor. Em sentido inverso, o ESP32 publica no tópico ESP_TO_PC a resposta dos módulos secundários, que é pelo qual

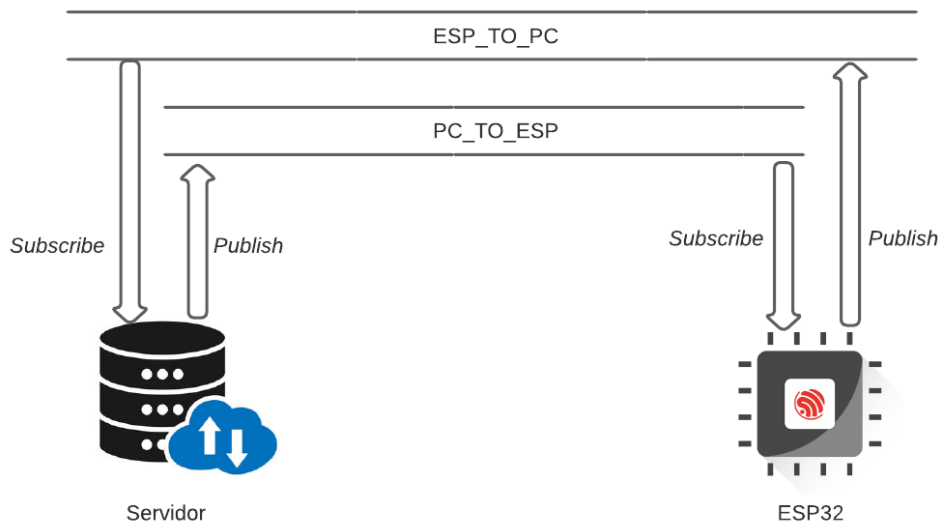


Figura 4.17: Implementação do protocolo MQTT no projeto.

estas chegam ao servidor, uma vez que o ESP32 subscreve esse tópico. O código desenvolvido para o ESP32 pode ser dividido em três secções principais: as inicializações, a receção das mensagens do tópico PC_TO_ESP e a publicação de mensagens no *broker*. Em relação às inicializações, o fluxograma da função responsável pelas mesmas está representado na Figura 4.18.



Figura 4.18: Fluxograma da função responsável pelas inicializações.

A função representada na Figura 4.18 começa com a inicialização do módulo RFM95W através da definição dos pinos RST, NSS e DIO0 e da frequência de operação de 868

MHz. Depois, é feita a configuração do WiFi que consiste na ligação do ESP32 a uma rede de internet. Neste momento, é definida a rede a que se pretende ligar, é inserida a palavra-passe da rede e o endereço do servidor MQTT. De seguida, é feita a configuração do MQTT onde são definidos o tópico de subscrição (PC_TO_ESP) e de publicação (ESP_TO_PC) do ESP32. Sempre que são publicadas mensagens no *broker* por parte do servidor, é executada uma função que está representada na Figura 4.19.

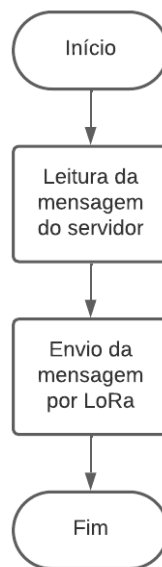


Figura 4.19: Fluxograma da função responsável pelo envio do identificador.

A função ilustrada no fluxograma da Figura 4.19 tem como objetivo ler as mensagens do *broker* e enviar as mesmas para os módulos secundários através do módulo RFM95W. Estas mensagens dizem respeito aos identificadores de cada módulo. Por último, foi definida uma função que aguarda pela resposta dos módulos secundários com os valores dos parâmetros atmosféricos e publica as mesmas no tópico ESP_TO_PC através do *broker*. O fluxograma desta função está apresentado na Figura 4.20.

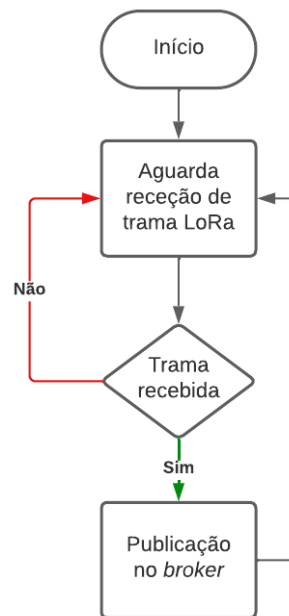


Figura 4.20: Fluxograma da função de leitura da resposta dos módulos secundários.

4.5 Resumo do Capítulo 4

Neste capítulo foram abordados os temas mais específicos deste projeto. Foi feita uma análise mais detalhada dos diferentes módulos que compõem o sistema. Começou-se por analisar o *hardware* dos módulos secundários através da análise dos esquemas elétricos dos mesmos. Procedeu-se depois ao estudo do *software* destes módulos secundários com recurso a fluxogramas dos mesmos. De seguida, foi feito o mesmo estudo para o módulo principal do sistema, de forma semelhante aos módulos secundários.

Capítulo 5

Implmenetação do Servidor e da Interface de Utilizador

Neste capítulo serão abordados diferentes temas relacionados com a implementação de um servidor e com o desenvolvimento do *frontend* e do *backend* do *website* criado.

5.1 Implementação do Servidor

Para suportar o sistema desenvolvido foi criado um servidor que engloba as tecnologias que permitem o controlo, armazenamento e apresentação dos dados recolhidos pelo sistema. Para tal, instalou-se o sistema operativo Fedora 38 num computador. Foram consideradas algumas opções em relação à máquina a utilizar para atingir o objetivo proposto, como, por exemplo, a utilização de um Raspberry Pi. No entanto, de modo a reduzir o custo total do projeto, optou-se pela instalação do Fedora 38 num computador que já se encontrava disponível e que possui as características listadas na Tabela 5.1.

Depois de instalada a *workstation* Fedora 38 na máquina descrita, procedeu-se com a instalação dos serviços necessários no ambiente Linux. Para a criação de uma base de dados que permitisse armazenar os valores lidos pelos sensores e enviados pelos módulos secundários recorreu-se ao *software* XAMPP. Este programa possui ferramentas como a base de dados MySQL ou o servidor Apache, para além de suportar as linguagens de programação *PHP: Hypertext Preprocessor* (PHP) e Perl. Com recurso ao XAMPP foi criada uma base de dados com várias tabelas, uma

Tabela 5.1: Características do computador utilizado.

Característica	Descrição
Processador	AMD Ryzen 7 3750H
Armazenamento	512 GB SSD
Memória RAM	16 GB DDR4-2400
Placa gráfica	AMD Radeon™ RX 5500M com 4GB GDDR6

para cada parâmetro atmosférico. Foram também criadas tabelas para armazenar valores de variáveis relacionadas com a qualidade do sinal rádio entre os módulos secundários e o módulo principal. Esses parâmetros são o *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), o *Signal to Noise Ratio* (SNR) e o *Frequency Error* (FE). Estas tabelas criadas estão apresentadas na Figura 5.1.

Tabela	Ação	Registos	Tipo	Agrupamento (Collation)	Tamanho
Precipitacao	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	21,779	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
Humidade	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	20,223	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
VelVento	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	20,388	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
IntSolar	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	20,096	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
Radiacao	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	20,225	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
Pressao	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	20,207	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
Temperatura	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	20,149	InnoDB	utf8mb4_general_ci	1.5 MB
RSSI1	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,124	InnoDB	utf8mb4_general_ci	384.0 KB
RSSI3	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,112	InnoDB	utf8mb4_general_ci	304.0 KB
SNR1	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,069	InnoDB	utf8mb4_general_ci	304.0 KB
RSSI2	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,112	InnoDB	utf8mb4_general_ci	288.0 KB
FREQ1	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,069	InnoDB	utf8mb4_general_ci	288.0 KB
FREQ2	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,074	InnoDB	utf8mb4_general_ci	288.0 KB
FREQ3	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,073	InnoDB	utf8mb4_general_ci	272.0 KB
SNR2	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,079	InnoDB	utf8mb4_general_ci	288.0 KB
SNR3	★ [Ícone] Procurar [Ícone] Estrutura [Ícone] Pesquisar [Ícone] Inserir [Ícone] Limpa [Ícone] Eliminar	8,077	InnoDB	utf8mb4_general_ci	288.0 KB
16 tabelas	Soma	215,856	InnoDB	utf8mb4_general_ci	13.3 MB

Figura 5.1: Tabelas da base de dados do sistema.

Para efetuar o controlo do sistema foi desenvolvido o programa que é executado permanentemente no servidor, utilizando a linguagem de programação Python. Este código tem três funções principais, sendo estas a publicação do identificador dos módulos secundários no *broker*, o tratamento dos dados enviados pelos módulos secundários e a inserção dos valores tratados na base de dados. O fluxograma da função principal deste programa está representado na Figura 5.2.

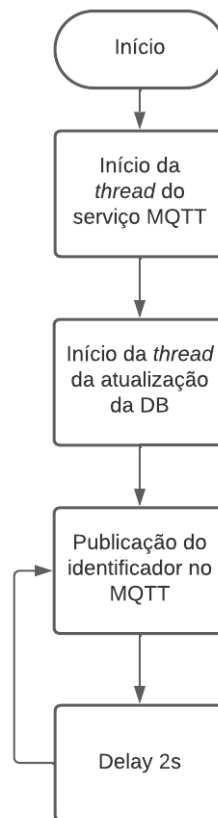


Figura 5.2: Fluxograma da função principal do programa.

Como se observa através da Figura 5.2 a função principal começa com a criação de duas *threads*, que executam constantemente duas funções: uma para o MQTT e outra para a atualização da base de dados. Depois da criação destas duas *threads* o código entra num ciclo infinito em que publica no *broker* MQTT os identificadores de cada módulo secundário com um intervalo de dois segundos. A *thread* do MQTT estabelece a ligação do servidor ao *broker* e define uma função de *callback*, que tem como objetivo fazer o tratamento dos dados recebidos. As funções de *callback* são executadas sempre que determinados eventos ocorrem. No caso da função de tratamento de dados, esta é executada sempre que o ESP32 publica a resposta dos módulos secundários no tópico `ESP_TO_PC`. O fluxograma desta função responsável pelo tratamento de dados está ilustrado na Figura 5.3.

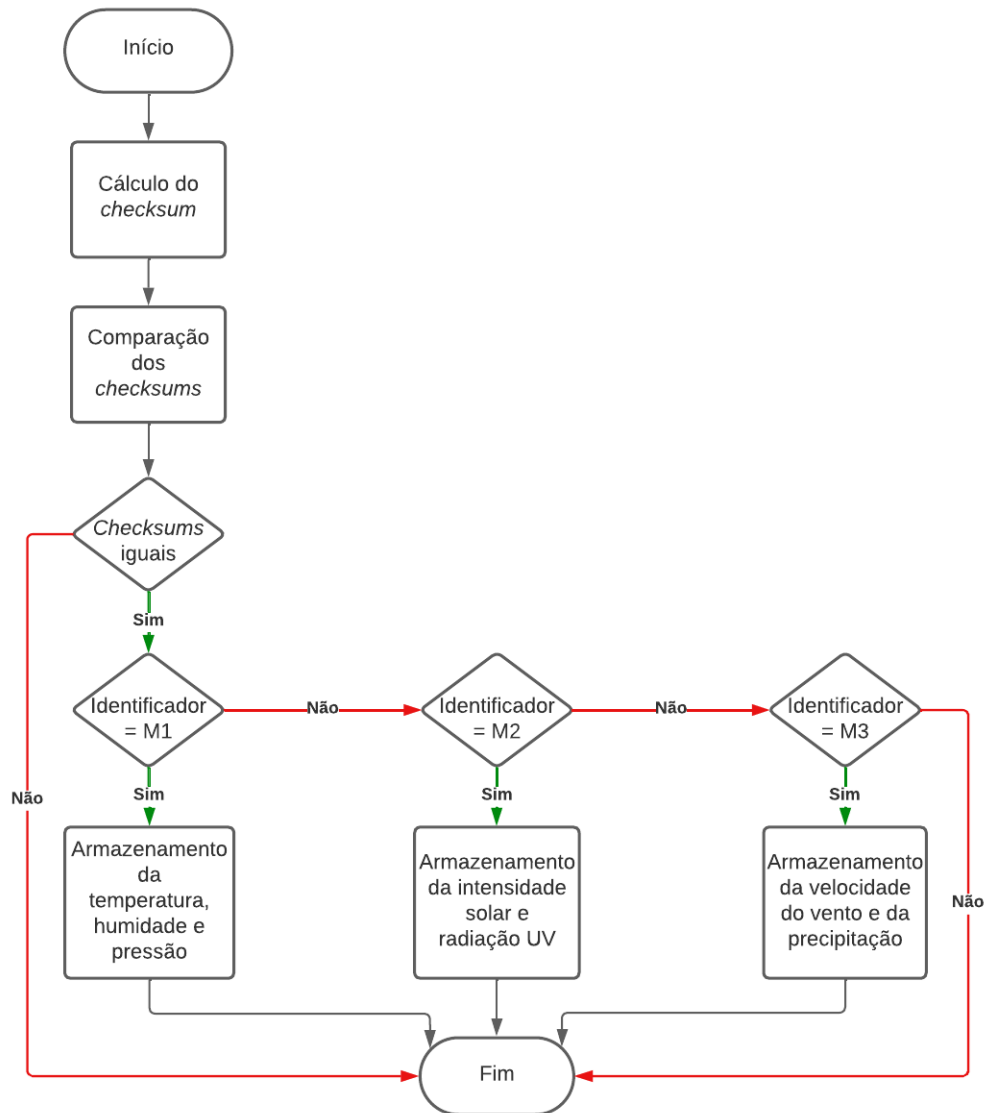


Figura 5.3: Fluxograma da função de tratamento de dados.

Como é possível constatar na Figura 5.3, a função inicia com o cálculo do *checksum*, através da soma dos valores dos parâmetros recebidos. De seguida, este valor é comparado com o valor do *checksum* enviado pelos módulos secundários na trama LoRa. Se os *checksums* forem iguais significa que não ocorreram erros na comunicação e que a trama está, em princípio, correta. Nesse caso, é verificado qual o identificador que é enviado na trama, com o objetivo de se averiguar que módulo enviou a trama. Depois, dependendo do módulo que respondeu, os valores dos parâmetros são armazenados em variáveis próprias e armazenadas para posteriormente serem inseridas na base de dados. Esta atualização da base de dados é feita pela função executada na segunda *thread* definida. O fluxograma da função da atualização da base de dados está representado na Figura 5.4.

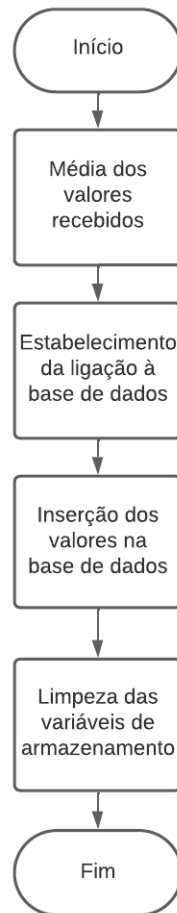


Figura 5.4: Fluxograma da função de atualização da base de dados.

O fluxograma da Figura 5.4 começa com a média dos valores recebidos. O servidor envia um identificador a cada dois segundos, o que significa que este envia o mesmo identificador com um intervalo de seis segundos. Assim, optou-se por apenas atualizar a base de dados a cada trinta segundos, de modo a reduzir o número de escritas na base de dados. No primeiro bloco do fluxograma a média representada diz então respeito aos valores enviados pelos módulos secundários, ao longo de um período de trinta segundos. Depois de ser feita a média, é estabelecida a ligação do servidor à base de dados e procede-se com a atualização da mesma, com os novos valores. Por último, são limpas as variáveis de armazenamento, de modo a não interferirem com a média seguinte.

5.2 Implementação da Interface de Utilizador

Como já foi referido anteriormente, para desenvolver o *website* para a apresentação dos valores lidos foi utilizada a *framework* de JavaScript Vue.js, que se foca no desenvolvimento de interfaces de utilizador e de *Single-Page Applications* (SPA). Esta escolha deveu-se ao facto desta *framework* já ter sido utilizada em projetos anteriores. A utilização de SPA significa que a aplicação *web* carrega uma única página *HyperText Markup Language* (HTML) e vai atualizando a mesma dinamicamente à medida que o utilizador interage com a página. Esta atualização é feita com recurso a páginas individuais construídas com recurso às típicas linguagens de programação *web* HTML e JavaScript. Cada uma destas páginas é frequentemente denominada de *view*. O *website* desenvolvido é composto por 14 *views*, como está ilustrado na Figura 5.5.

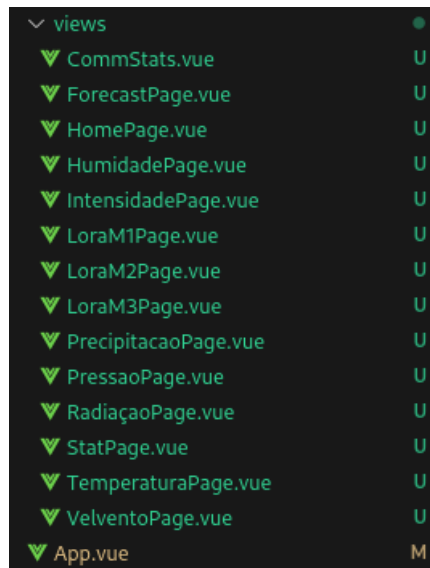


Figura 5.5: *Views* que compõem o *website*.

Na Figura 5.5 observa-se as *views* constituintes do *website* e que permitem a apresentação de várias páginas diferentes. Para a apresentação dos dados recolhidos pelos sensores optou-se pela utilização de gráficos, tendo sido criados três gráficos para cada parâmetro que correspondem à apresentação dos valores lidos ao longo de três intervalos de tempo distintos: uma hora, um dia e desde o início das leituras. Assim, as *views* TemperaturaPage.vue, HumidadePage.vue, PressaoPage.vue, IntensidadePage.vue, RadiacaoPage.vue, Velvento.vue e PrecipitacaoPage.vue correspondem à apresentação de três gráficos por página, para os respetivos parâmetros. Para além destas *views* existem ainda a HomePage.vue, correspondente à página principal, a CommStatsPage.vue, que diz respeito às estatísticas da comunicação entre os módulos secundários e o módulo primário, as LoraM1Page.vue, LoraM2Page.vue, LoraM3Page.vue onde são apresentados valores do RSSI, do SNR e da FE para cada

módulo, a StatPage.vue, que está relacionada com as estatísticas meteorológicas da estação e, por último, a ForecastPage.vue, que corresponde à previsão meteorológica para os sete dias seguintes com recurso à *Application Programming Interface* (API) OpenWeatherMap. A navegação entre cada *view* é estabelecida através da interface de encaminhamento do Vue.js denominada *Vue Router*. Esta interface permite a criação de rotas entre cada página, como se observa na Figura 5.6.

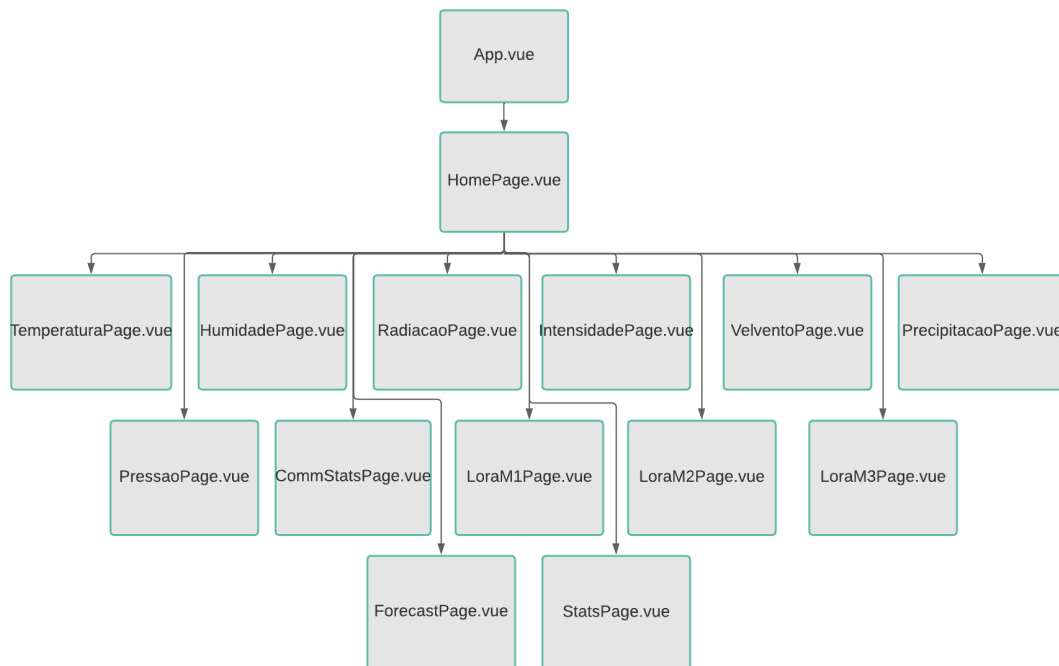


Figura 5.6: Esquema de encaminhamento do *website*.

Por último, é necessário referir que para estabelecer a ligação entre o *backend* e o *frontend* foram utilizados *scripts* escritos com recurso à linguagem PHP. Estes *scripts* possuem *queries* que são executadas quando os ficheiros PHP são chamados no *frontend*. Assim sendo, todos os gráficos e todos os locais do *website* onde são apresentados valores da base de dados possuem uma *query* associada.

5.3 Resumo do Capítulo 5

No quinto capítulo do presente relatório começou-se por abordar as ferramentas que foram utilizadas do lado do servidor, como o XAMPP. De seguida, procedeu-se com a análise do código Python que corre no servidor através da apresentação de fluxogramas das funções principais do programa. Por último, introduziu-se o *software* utilizado no desenvolvimento do código *frontend* do *website*, e foram apresentadas algumas das suas características, como as *views* que o compõem e o sistema de encaminhamento das rotas do *website*.

Capítulo 6

Testes e Resultados

A implementação do sistema descrito nos capítulos anteriores proporcionou os resultados que serão apresentados nas secções seguintes, onde será feita a interpretação dos resultados obtidos. Para a validação do projeto desenvolvido serão apresentados os resultados do *website* onde são demonstrados os valores lidos pelos sensores, assim como outros valores relevantes.

6.1 Análise dos Dados Recolhidos

Como já foi referido anteriormente, para cada parâmetro atmosférico foi criada uma página no *website* que permite a apresentação dos valores recolhidos através de gráficos. No entanto, foi também criada uma página principal no *website* onde são apresentados os valores dos parâmetros atmosféricos em tempo real. Esta página principal possui ainda uma barra lateral que possibilita ao utilizador mudar de página, e uma barra superior que lhe permite regressar à página principal sempre que este o desejar. A atualização dos valores presentes na página principal, assim como dos valores dos gráficos, é feita a cada trinta segundos, de modo a corresponder ao tempo de envio dos dados do servidor para a base de dados. O período de operação do sistema desde o seu início até a recolha dos dados do *website* foi de uma semana, de 24 a 31 de Agosto de 2023. A página principal do *website* está representada na Figura 6.1.

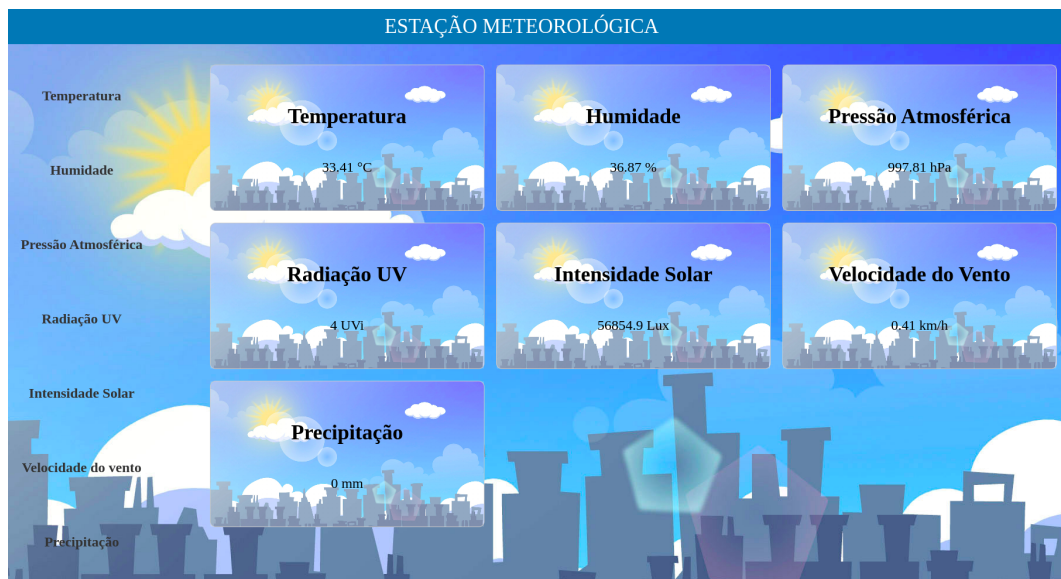


Figura 6.1: Página principal do *website*.

Na Figura 6.1 verifica-se a apresentação dos diferentes parâmetros atmosféricos e dos seus respetivos valores em tempo real, tendo sido criada uma caixa para cada parâmetro. No lado esquerdo da Figura 6.1 observa-se também a referida barra lateral, que permite ao utilizador analisar cada parâmetro atmosférico com mais detalhe. Carregando num dos botões da barra lateral, o utilizador é redirecionado para a respetiva página. A página referente à temperatura, que equivale ao primeiro botão da barra lateral, está representada na Figura 6.2.

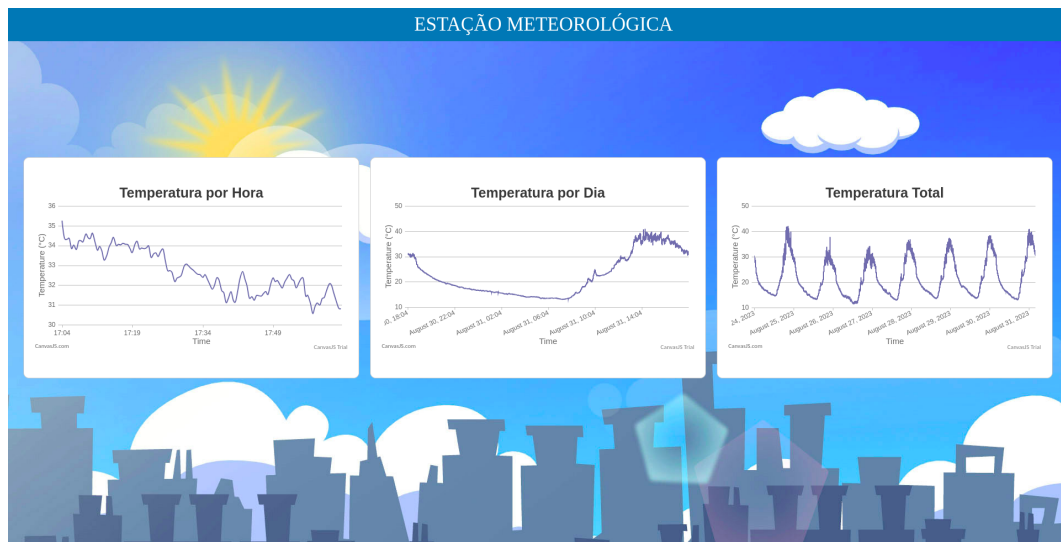


Figura 6.2: Valores de temperatura recolhidos.

Na Figura 6.2 confirma-se a apresentação dos valores recolhidos ao longo de três intervalos de tempo. Como seria de esperar, a temperatura reduz durante a noite,

atingindo os valores mais elevados durante o dia. Em relação ao parâmetro de humidade atmosférica, os valores recolhidos estão apresentados na Figura 6.3.

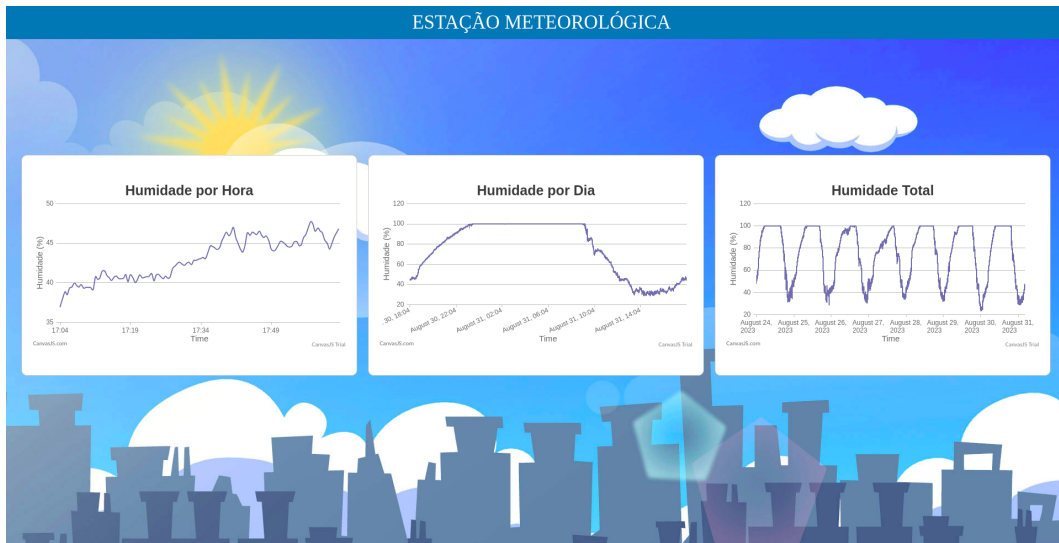


Figura 6.3: Valores de humidade recolhidos.

Na Figura 6.3 verifica-se uma tendência inversa ao que acontece nos valores da temperatura. Enquanto que estes atingem os valores mais elevados durante o dia, a humidade atinge os valores mais elevados durante a noite, tendo mesmo sido detetado o valor máximo de humidade lido pelo sensor de 99.99%. Esta relação entre a humidade e a temperatura verifica-se uma vez que a temperaturas altas o ar possui uma maior capacidade de retenção de vapor de água, resultado numa humidade atmosférica mais dispersa, reduzindo o seu valor. Durante a noite, o ar atinge o seu ponto de saturação que corresponde ao momento em que este não consegue reter mais vapor de água. Nesta altura, o vapor de água condensa, formando gotas de água e aumentando o valor da humidade atmosférica. O parâmetro seguinte disponível na barra lateral é a pressão atmosférica, cuja respetiva página desenvolvida está ilustrada na Figura 6.4.

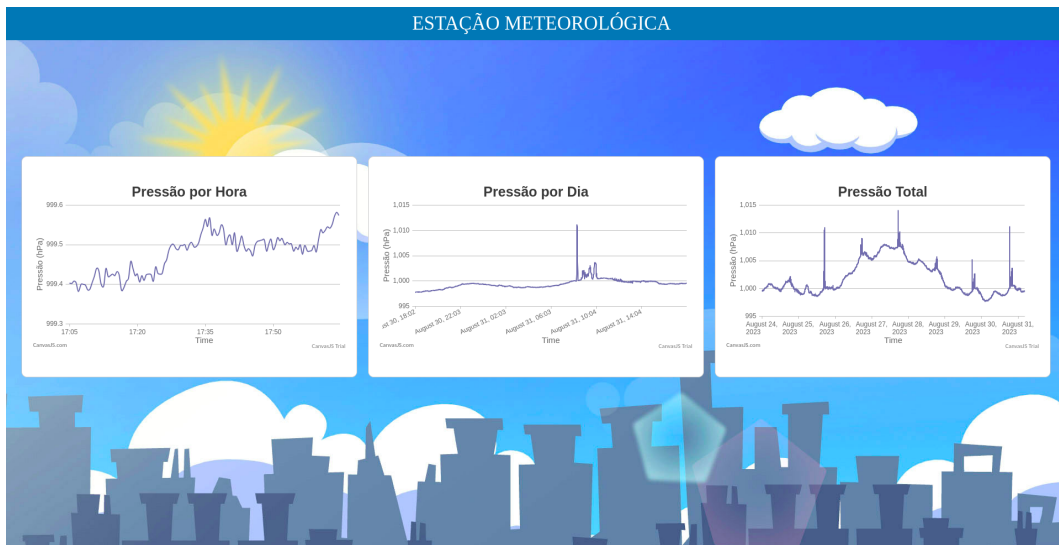


Figura 6.4: Valores de pressão atmosférica recolhidos.

A pressão atmosférica corresponde à força exercida pelo peso da atmosfera acima de um determinado ponto. Assim, a pressão diminui com o aumento da altitude, e vice-versa. Uma vez que o sensor de pressão atmosférica esteve colocado no mesmo sítio ao longo de todo o período de medições, conclui-se que as variações presentes nos gráficos da Figura 6.4 não foram provocados pela variação da altitude. Assim, outras causas para a variação da mesma são, por exemplo, a variação da temperatura, uma vez que o ar quente é menos denso e exerce uma força menor no sensor, provocando uma diminuição da pressão. Outra justificação são os sistemas de alta e de baixa pressão. Os sistemas de alta pressão, ou anticiclones, estão associados à descida do ar, o que aumenta a pressão atmosférica. Os sistemas de baixa pressão envolvem a ascensão do ar, diminuindo a pressão atmosférica. Os sistemas de alta pressão estão normalmente associados a céus limpos e condições atmosféricas estáveis, enquanto que os sistemas de baixa pressão estão associados a um clima instável, com nuvens e precipitação. No período de recolha de dados as temperaturas estiveram elevadas, como se comprova pela Figura 6.2 e os céus limpos, pelo que a passagem de um sistema de alta pressão justifica o aumento da pressão verificado no gráfico da pressão total da Figura 6.4. Depois de analisados os gráficos da pressão atmosférica, surgem agora os parâmetros relacionados com a luz solar: a intensidade solar e a radiação UV. Em relação à intensidade solar registada, os valores recolhidos estão representados na Figura 6.5.

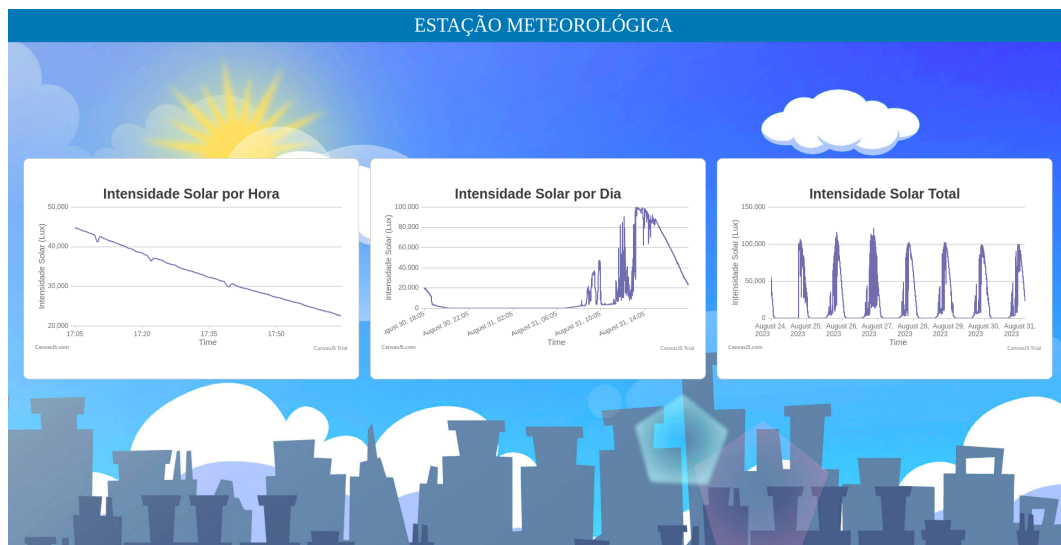


Figura 6.5: Valores da intensidade solar recolhidos.

Uma vez que a casa onde a estação meteorológica foi implementada se encontra rodeada por diversas árvores, as leituras dos valores da intensidade solar foram influenciadas pela sombra aplicada por estas árvores ao sensor de intensidade solar. Assim, as variações bruscas dos valores de intensidade solar observadas na Figura 6.5 podem ser justificadas por estas sombras, para além da passagem de nuvens por cima da estação, que provocam o mesmo efeito. A intensidade solar foi analisada em lux (lx), uma unidade usada para a variação do fluxo luminoso por unidade de área. Já em relação à leitura da radiação UV, os valores recolhidos estão ilustrados na Figura 6.6.

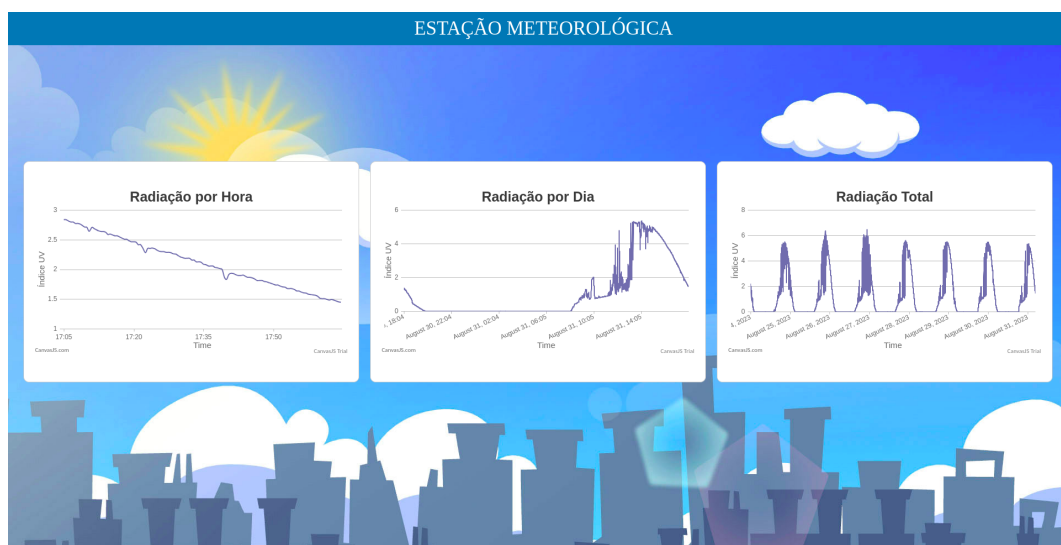


Figura 6.6: Valores da radiação UV recolhidos.

Através da análise da Figura 6.6 verifica-se os valores de radiação solar recolhidos pelo sensor de radiação UV sofreram do mesmo problema das leituras do sensor

de intensidade solar, uma vez que foram influenciadas pela sombra das árvores, em alguns momentos. A medição dos valores de radiação UV foi feita com recurso ao índice de radiação UV adotado pela OMM em 1994, e que varia de 0 a 11.

O parâmetro seguinte a ser analisado corresponde à velocidade do vento, medida através do anemómetro anteriormente referido, cujas medições registadas estão representadas na Figura 6.7.

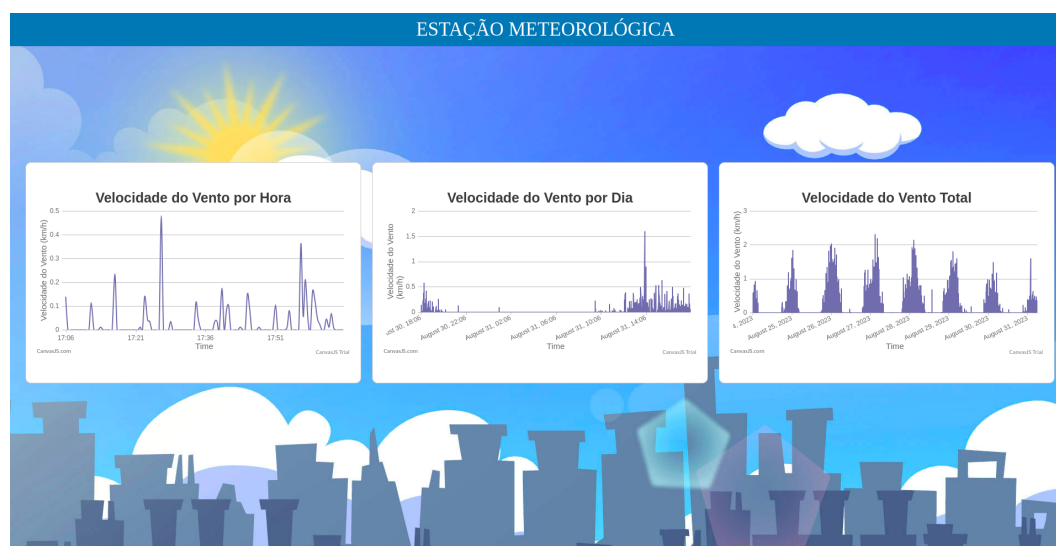


Figura 6.7: Valores da velocidade do vento recolhidos.

A Figura 6.7 permite a verificação do facto da velocidade do vento reduzir bastante durante a noite, ao ponto de ser praticamente nula. Esta oscilação diária pode ser explicada pela inversão noturna da temperatura. Quando o sol se põe, a temperatura da superfície terrestre diminui, o que pode criar uma camada estável de ar fresco, impedindo o desenvolvimento de correntes de vento fortes. Outro fator que afeta a velocidade do vento é a altitude do anemómetro, uma vez que a velocidade do vento geralmente aumenta com a altitude. As anteriormente referidas árvores que rodeiam a estação podem também ter alguma influência nas medições, visto que podem obstruir e diminuir a velocidade do vento. O último parâmetro a analisar é a precipitação. Uma vez que não se registou qualquer período de chuva ao longo do intervalo de medição, os valores recolhidos culminaram em gráficos praticamente nulos, como está representado na Figura 6.8.



Figura 6.8: Valores da precipitação recolhidos.

No sentido de se proporcionar uma vista geral dos valores recolhidos pelos sensores, foi adicionada uma página ao *website* onde se apresentam as estatísticas gerais dos parâmetros em questão, como se observa pela Figura 6.9.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA			
Parâmetro Meteorológico	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
Temperatura (°C)	11.55	41.98	21.49
Humidade (%)	23.34	99.99	76.18
Pressão Atmosférica (hPa)	997.68	1014.11	1001.83
Radiação UV (UVI)	0	6.31	1.21
Intensidade Solar (Lux)	0	117758.2	19911.4
Velocidade do Vento (km/h)	0	2.31	0.05
Precipitação (mm)	0	0	0

Figura 6.9: Estatísticas gerais dos parâmetros recolhidos.

Na página das estatísticas estão apresentados três valores determinados para cada variável: o valor mínimo, o valor máximo e o valor médio. A Figura 6.9 permite constatar que o valor mínimo de temperatura lido foi de 11.55 °C, enquanto que o máximo foi de 41.98 °C. Já a média de todos os valores lidos foi de 21.49 °C. Já em relação à humidade o valor mais baixo de 23.34 % foi registado durante o dia, já o valor mais alto foram os anteriormente referidos 99.99 %, e o valor médio foi de 76.18 %. A pressão atmosférica variou entre os valores mínimo de 997.68 hPa e máximo de 1014.11 hPa, tendo sido obtido um valor médio de todas as leituras de 1001.83

hPa. A intensidade solar e a radiação UV possuem os valores esperados mínimos de 0, naturalmente obtidos durante a noite. Em relação ao primeiro parâmetro foi obtido um máximo de 117758.2 lux e médio de 19991.4 lux, já no que diz respeito à radiação UV foi lido o valor máximo de 6 (na escala de UV) e médio de 1. Por último, a velocidade do vento máxima registada foi 2.31 km/h, enquanto que em termos de precipitação não foram registados quaisquer valores.

6.2 Análise dos Resultados Obtidos

Para testar os resultados obtidos foi adicionado ao *website* uma página com a previsão meteorológica dos parâmetros em questão por parte fontes oficiais. Para tal, foi feito um pedido à API do *website* OpenWeatherMap no sentido de serem obtidos esses valores. Os valores recebidos da API foram incorporados em gráficos, de forma semelhante aos valores recolhidos pela estação, como se observa pela Figura 6.10.

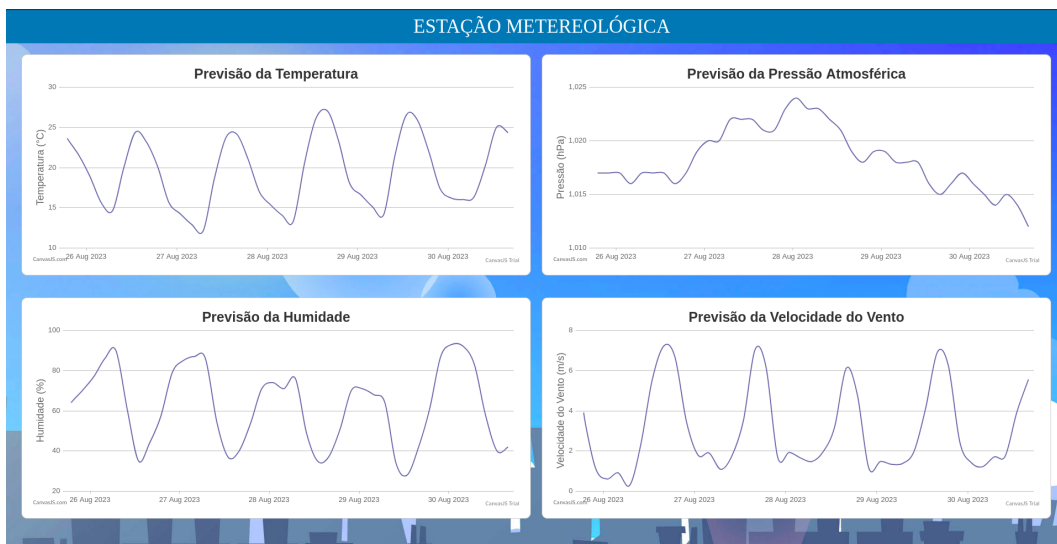


Figura 6.10: Previsão oficial de alguns parâmetros recolhidos pela estação.

Na Figura 6.10 constata-se que o primeiro parâmetro recebido é a temperatura. A comparação dos gráficos da temperatura da API e da estação está disponível na Figura 6.11.

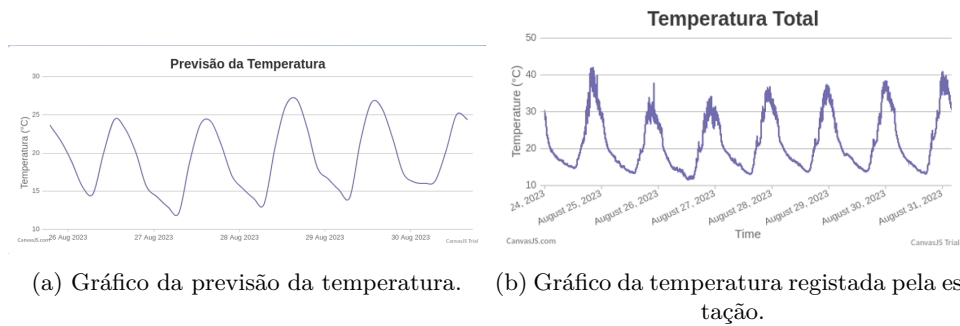


Figura 6.11: Comparação dos valores de temperatura da estação e da API.

A análise dos gráficos da Figura 6.11 permite concluir que embora estes sejam semelhantes em termos de curva, os valores são ligeiramente diferentes no que toca aos valores recolhidos durante o dia, o que pode ser justificado por uma isolamento incorreto do sensor de temperatura da estação. Já durante a noite os valores são coincidentes, verificando-se o mesmo valor mínimo de cerca de $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na madrugada do dia 27 de Agosto. O parâmetro seguinte é a pressão atmosférica, cuja comparação dos gráficos está disponível na Figura 6.12.

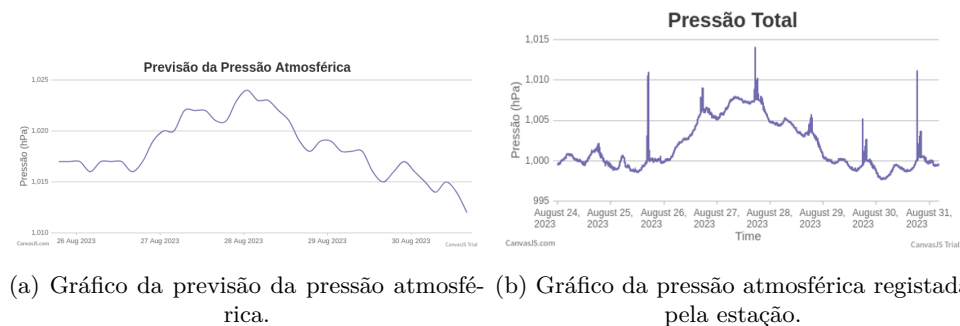


Figura 6.12: Comparação dos valores de pressão atmosférica da estação e da API.

A Figura 6.12 indica mais uma vez os gráficos registados pela estação e pela API apresentam grande semelhança na tendência da medição dos valores, apesar da ligeira diferença numérica dos mesmos, uma vez que os valores da API são um pouco mais elevados. Esta diferença entre os valores pode ser explicada pela diferença de altitude entre a localização do sensor e a área para onde foram previstos os valores de pressão atmosférica. Já em relação à humidade, foi também feita uma comparação entre os valores, representada na Figura 6.13.

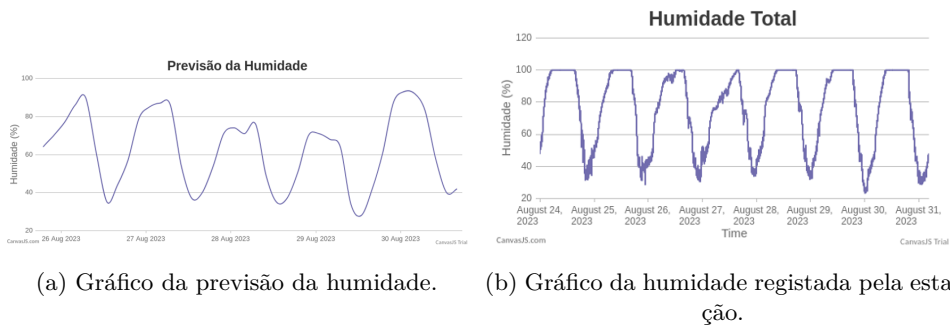


Figura 6.13: Comparação dos valores de humidade da estação e da API.

Na Figura 6.13 confirma-se que a tendência dos valores dos gráficos é, novamente, semelhante, sendo atingidos valores mais elevados por parte do sensor da estação meteorológica desenvolvida. Por último, a comparação dos gráficos da velocidade do vento está representada na Figura 6.14.

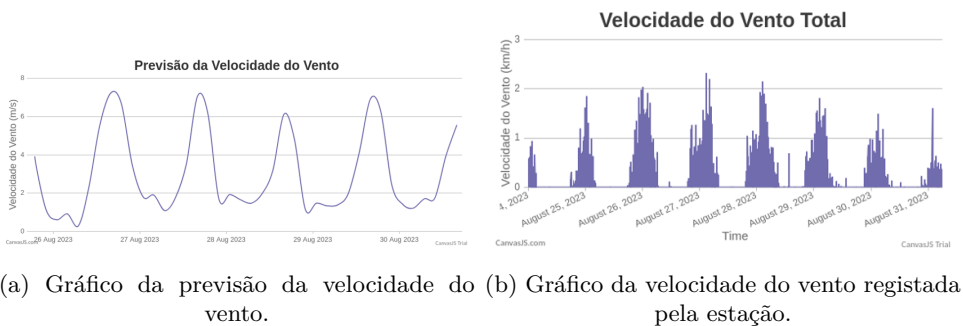


Figura 6.14: Comparação dos valores de velocidade do vento da estação e da API.

A Figura 6.14 mostra que uma vez mais as curvas dos gráficos são aproximadas, no entanto, verificou-se que a velocidade do vento era de 0 km/h durante largos períodos de tempo, durante a noite, com se observa na Figura 6.14b. Verifica-se também que foram registados valores mais baixos do que o previsto durante o dia. Em relação aos parâmetros da radiação e da intensidade solar, estes não estavam incluídos nos parâmetros fornecidos pela API. Já no que diz respeito à precipitação não foi necessária qualquer comparação, visto que não choveu no período de recolha de dados.

6.3 Análise e Testes da Comunicação LoRa

Depois de analisados os valores recolhidos pela estação, segue-se agora a análise da comunicação LoRa estabelecida entre os módulos secundários e o módulo principal. Esta análise será feita com recurso aos três parâmetros referidos anteriormente que permitem verificar a qualidade de um sinal deste tipo: o RSSI, o SNR e o FE. Para

tal, foram adicionadas páginas ao *website* onde são apresentados os registos, sob forma de gráficos, dos parâmetros das comunicações entre os módulos secundários e o módulo principal. A página desenvolvida para o primeiro módulo secundário está disponível na Figura 6.15.

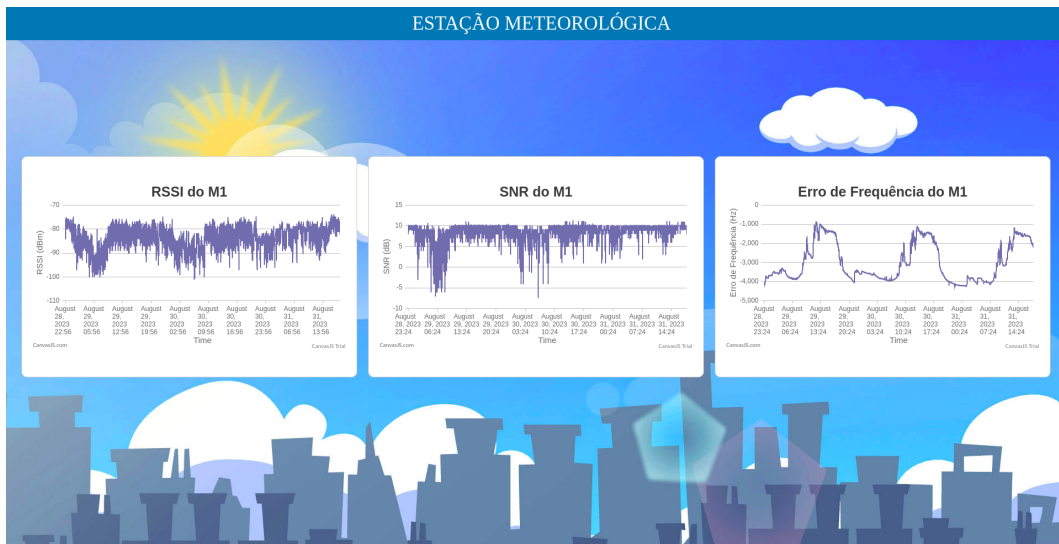


Figura 6.15: Registo dos parâmetros da comunicação do primeiro módulo secundário.

O RSSI indica a potência do sinal recebido, em decibel por miliwatt, pelo que quanto maior for o valor, melhor a qualidade do sinal. Já o SNR relaciona o sinal com o ruído, pelo que um valor mais elevado indica também uma melhor qualidade de comunicação. Por último, o FE indica a relação entre a frequência do sinal recebida e a frequência esperada. Um valor positivo de FE indica que a frequência recebida é superior ao que era expectável, enquanto que valor negativo indica que a frequência recebida é inferior ao esperado. No que diz respeito à comunicação do segundo módulo secundário, os resultados estão representados na Figura 6.16.

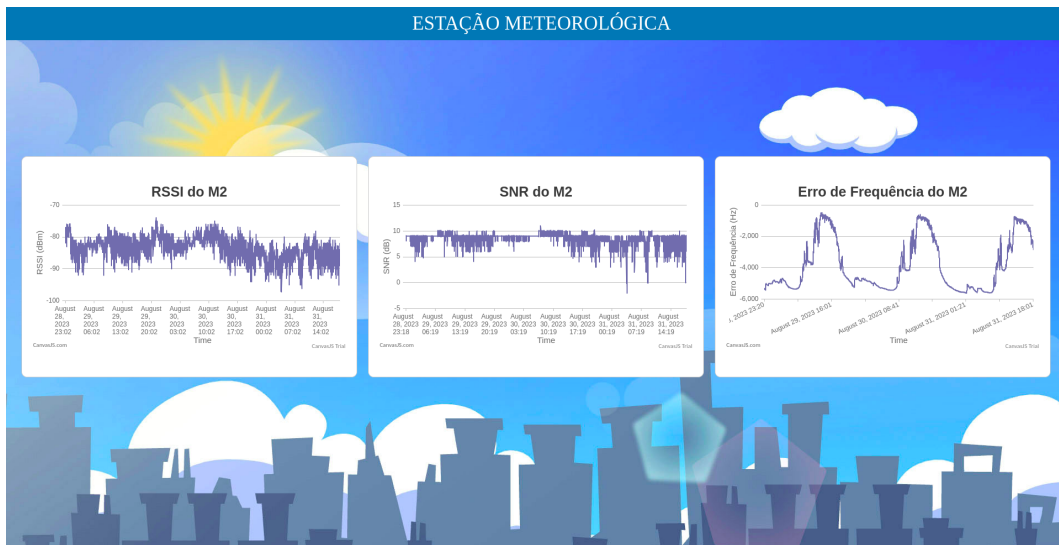


Figura 6.16: Registo dos parâmetros da comunicação do segundo módulo secundário.

Por último, na Figura 6.17 observa-se a comunicação referente ao terceiro módulo secundário.

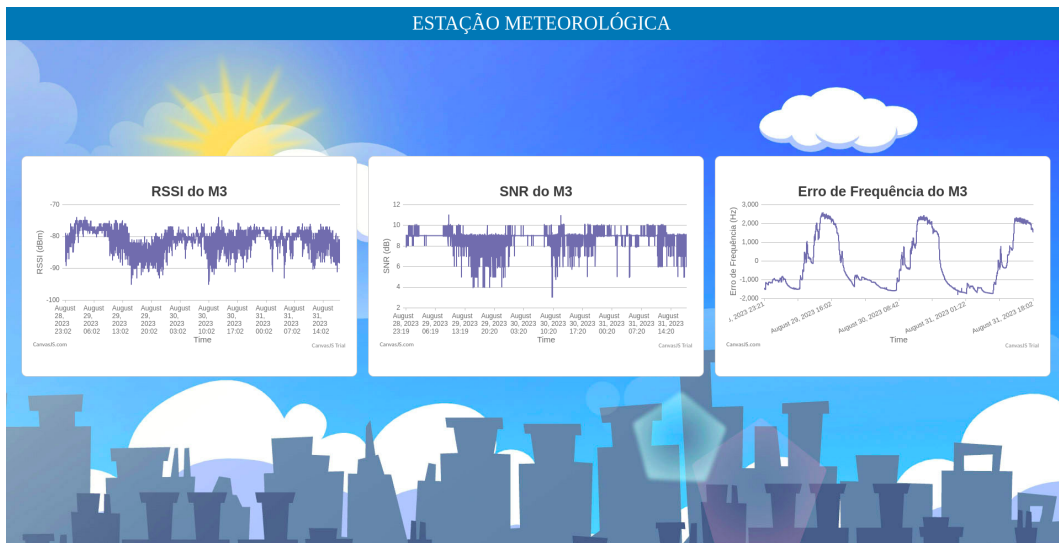


Figura 6.17: Registo dos parâmetros da comunicação do terceiro módulo secundário.

A análise das Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 permite verificar que existem períodos em que comunicação tem maior qualidade, embora os módulos tenham tido comportamentos diferentes. A Figura 6.15 revela que o primeiro módulo foi o que possuiu maiores oscilações nos seus parâmetros, o que se traduz numa comunicação mais instável quando comparado com os outros módulos secundários. O segundo módulo secundário possui menos oscilações nos seus valores mas, ainda assim, possui uma maior amplitude nos valores registados, quando comparado com terceiro módulo. De

uma forma geral, as estatísticas da comunicação dos três módulos secundários foram registadas num página desenvolvida para esse efeito, como se observa na Figura 6.18.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA			
Parâmetro de Comunicação	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
RSSI1	-101	-74	-83.67
RSSI2	-97	-74	-83.47
RSSI3	-95	-74	-81.04
SNR1	-7	11	8.54
SNR2	-2	11	8.5
SNR3	3	11	8.76
FREQ1	-4253	-875	-3000.66
FREQ2	-5621	-474	-3845.83
FREQ3	-1790	2578	-171.45

Figura 6.18: Estatísticas da comunicação dos módulos secundários.

Através da observação da Figura 6.18 é possível constatar que o terceiro módulo secundário possui a comunicação com mais qualidade, uma vez que possui os valores médios mais elevados de RSSI e SNR. Em contrapartida, o primeiro módulo secundário possui uma comunicação com qualidade menor, devido aos valores médios mais baixos de RSSI e SNR, quando comparado com os restantes módulos. Estas discrepâncias nos valores da comunicação podem ser explicadas pelo conteúdo das tramas. O primeiro módulo secundário é o que envia as tramas mais longas, uma vez que recolhe os valores de três parâmetros atmosféricos. Já o terceiro módulo secundário envia dois parâmetros, sendo que um deles, a precipitação, foi constante nulo durante o período de recolha de dados.

No sentido de testar os limites deste módulo RFM95W em relação à qualidade da comunicação no que toca à distância entre módulos, foram feitos testes ao alcance do sinal. Para tal, foi enviada a trama "M1;24.78;83.49;999.20;1107.47" de um módulo RFM95W para outro, de modo a simular o envio de uma trama do primeiro módulo secundário a várias distâncias distintas. Os resultados deste teste estão representados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Teste ao alcance do módulo RFM95W.

Distância (m)	RSSI	SNR	FE	Trama Recebida	Trama Completa
0	-22	10.00	-3430	Sim	Sim
50	-83	10.00	-5024	Sim	Sim
100	-100	0.75	-5058	Sim	Sim
150	-106	1.25	-5125	Sim	Sim
200	-111	-5.50	-5360	Sim	Não
250	-103	-6.50	-5343	Sim	Não
300	-	-	-	Não	Não

A análise da Tabela 6.1 permite concluir que a qualidade da comunicação diminui com o aumento da distância entre dois módulos, como era expectável. Quando colocados a uma distância de até 250 m os módulos estabelecem uma comunicação através do envio e receção da trama referida, apesar desta nem sempre ser recebida na sua totalidade. A partir dos 250 m verificou-se que a trama deixa de ser recebida pelo módulo recetor.

6.4 Comunicação MQTT

No que diz respeito à comunicação MQTT que faz a ligação entre o servidor e o módulo principal, os resultados estão representados na Figura 6.19.

```
pc_to_esp M1
esp_to_pc M1;30.26;47.39;999.54;1077.19;-76;9.75;-2474
pc_to_esp M2
esp_to_pc M2;15972.42;1.00;15973.42;-83;9.25;-2961
pc_to_esp M3
esp_to_pc M3;0.00;0.00;0.00;-87;8.00;1300
pc_to_esp M1
esp_to_pc M1;30.34;47.39;999.52;1077.26;-80;9.75;-2457
pc_to_esp M2
esp_to_pc M2;15985.00;1.00;15986.00;-80;9.00;-2961
pc_to_esp M3
esp_to_pc M3;0.00;0.00;0.00;-82;8.75;1317
pc_to_esp M1
esp_to_pc M1;30.40;47.27;999.54;1077.21;-79;9.50;-2474
pc_to_esp M2
esp_to_pc M2;15963.44;1.00;15964.44;-80;9.00;-2961
pc_to_esp M3
esp_to_pc M3;0.00;0.00;0.00;-87;8.50;1300
pc_to_esp M1
INSERT INTO Temperatura (Valor) VALUES (%s) 30.29
INSERT INTO Humidade (Valor) VALUES (%s) 47.36000000000001
INSERT INTO Pressao (Valor) VALUES (%s) 999.54
INSERT INTO Radiacao (Valor) VALUES (%s) 0.994
INSERT INTO IntSolar (Valor) VALUES (%s) 15980.328
INSERT INTO VelVento (Valor) VALUES (%s) 0.0
INSERT INTO Precipitacao (Valor) VALUES (%s) 0.0
INSERT INTO RSSI1 (Valor) VALUES (%s) -80.75
INSERT INTO RSSI2 (Valor) VALUES (%s) -80.8
INSERT INTO RSSI3 (Valor) VALUES (%s) -84.4
esp_to_pc M1;30.44;47.17;999.52;1077.13;-92;5.75;-2441
INSERT INTO SNR1 (Valor) VALUES (%s) 9.1875
INSERT INTO SNR2 (Valor) VALUES (%s) 9.1
INSERT INTO SNR3 (Valor) VALUES (%s) 8.6
INSERT INTO FREQ1 (Valor) VALUES (%s) -2469.75
INSERT INTO FREQ2 (Valor) VALUES (%s) -2967.4
INSERT INTO FREQ3 (Valor) VALUES (%s) 1306.8
pc_to_esp M2
esp_to_pc M2;15886.17;1.00;15887.17;-77;9.75;-2961
```

Figura 6.19: Comunicação MQTT entre o servidor e o módulo principal e atualização da base de dados.

Na Figura 6.19 é possível observar as mensagens trocadas entre o servidor e o módulo principal através de MQTT. Na imagem observa-se também o respetivo tópico onde as mensagens são publicadas, sendo que o servidor publica os identificadores dos módulos no tópico `pc_to_esp` e o ESP32 publica as respostas dos módulos secundários no tópico `esp_to_pc`. A Figura 6.19 apresenta também o envio dos valores para as respetivas tabelas na base de dados a cada trinta segundos. Na Figura 6.20 está apresentada a tabela dos valores de humidade recolhidos e a respetiva hora.

	Id	Data	Valor
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21966	2023-08-31 18:26:30	48.245000000000005
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21965	2023-08-31 18:26:00	48.404999999999994
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21964	2023-08-31 18:25:30	48.136666666666666
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21963	2023-08-31 18:25:00	47.49
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21962	2023-08-31 18:24:30	47.5825
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21961	2023-08-31 18:24:00	47.455
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21960	2023-08-31 18:23:30	47.425
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21959	2023-08-31 18:23:00	47.687499999999999
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21958	2023-08-31 18:22:30	48.180000000000001
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21957	2023-08-31 18:22:00	48.320000000000001
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21956	2023-08-31 18:21:30	48.239999999999995
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21955	2023-08-31 18:21:00	47.894
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21954	2023-08-31 18:20:30	47.483999999999995
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21953	2023-08-31 18:20:00	46.598
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21952	2023-08-31 18:19:30	46.392
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21951	2023-08-31 18:19:00	46.994
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21950	2023-08-31 18:18:30	47.124000000000001
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21949	2023-08-31 18:18:00	46.43
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21948	2023-08-31 18:17:30	46.186
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21947	2023-08-31 18:17:00	46.278
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21946	2023-08-31 18:16:30	47.098
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21945	2023-08-31 18:16:00	47.38
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21944	2023-08-31 18:15:30	46.678
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21943	2023-08-31 18:15:00	46.902
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Apagar	21942	2023-08-31 18:14:30	46.798

Figura 6.20: Exemplo de uma tabela da base de dados.

6.5 Resumo do Capítulo 6

Neste capítulo começou-se por apresentar e analisar os resultados recolhidos pelos sensores e apresentados no *website*. Os valores recolhidos foram posteriormente comparados com registos oficiais através de um pedido de valores a uma API. De seguida, foi feita uma análise à comunicação LoRa entre os três módulos secundários e o módulo principal através dos valores de RSSI, SNR e FE. Foi também testado o alcance do sinal do módulo rádio RFM95W antes de se terminar o capítulo com uma breve apresentação da comunicação MQTT entre o módulo principal e o servidor.

Capítulo 7

Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema independente capaz de fazer a recolha e o tratamento de dados relacionados com os parâmetros atmosféricos.

No sentido de se atingir os objetivos propostos inicialmente, procedeu-se à implementação de uma estação meteorológica com recurso à atuais tecnologias IoT disponíveis. A estação desenvolvida é composta por três grupos de sensores associados a três microcontroladores que estabelecem uma comunicação LoRa com um módulo central. Considera-se que esta comunicação estabelecida foi bem sucedida, uma vez que os dados recolhidos foram recebidos do lado do servidor. No entanto, é importante referir que existiram falhas ocasionais na comunicação, sobretudo na comunicação entre o módulo principal e o primeiro módulo secundário, responsável pela aquisição da temperatura, humidade e pressão atmosférica, o que pode estar relacionado com o facto de ser o módulo que envia a trama mais longa. A comunicação entre o módulo principal e o servidor implementada com recurso ao protocolo MQTT foi feita com êxito, o que permitiu o sistemático tratamento dos dados recebidos. Por último, a interface de utilizador desenvolvida permite ao utilizador a análise dos parâmetros atmosféricos e das comunicações entre os módulos, através de páginas com gráficos e estatísticas dos valores recolhidos.

Em suma, o sistema desenvolvido apresentou-se como um desafio, sobretudo devido às diferentes tecnologias que o compõem. No entanto, a estação meteorológica implementada apresenta-se como um sistema útil na aquisição e análise de diversos parâmetros atmosféricos.

7.1 Trabalho Futuro

Apesar do sucesso da estação meteorológica implementada, o projeto desenvolvido pode naturalmente ser melhorado. O facto de não ter chovido no período de recolha de dados por parte da estação possibilitou que esta fosse implementada ao ar livre. Por um lado, este método permite que os sensores de intensidade solar e de radiação UV recolham dados sem qualquer interferência. Por outro lado, verificou-se que o sensor de temperatura recolhia valores superiores aos reais, devido a uma tentativa de isolamento sem sucesso. Assim, uma das principais melhorias deste projeto seria a utilização de materiais *Ingress Protection* (IP) 68 que são resistentes à água e à poeira e resultariam num melhor isolamento do sistema.

Para além do isolamento, verificou-se também que o tipo de alimentação selecionado no projeto do sistema, ou seja, as baterias de lítio, revelaram-se insuficientes para a alimentação do sistema durante períodos de tempo extensos. Assim, sugere-se a alimentação do sistema diretamente a partir da rede elétrica, de modo a que esta seja ininterrupta.

Por último, a utilização de um domínio público para o *website* permitiria que este fosse acessado em qualquer lugar, em vez de apenas na máquina local, como acontece atualmente.

Referências

- [1] M. B. e Alan Thorpe, “The weather: What’s the outlook?,” *Bulletin*, vol. 64, 2015. Disponível em <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/weather-whats-outlook-0>. [Citado na página 1]
- [2] “Glossário climatológico/meteorológico,” *Instituto Português do Mar e da Atmosfera*. Disponível em https://www.ipma.pt/pt/educativa/glossario/meteorologico/index.jsp?page=glossario_ef.xml&print=true. [Citado na página 2]
- [3] R. Davies, “The internet of things: Opportunities and challenges,” *European Parliamentary Research Service*, 2015. Disponível em [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/557012/EPRS_BRI\(2015\)557012_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/557012/EPRS_BRI(2015)557012_EN.pdf). [Citado nas páginas 6 e 9]
- [4] Business+Tech, “Tech 101: Internet of things,” Imagem disponível em <https://businesstech.bus.umich.edu/uncategorized/tech-101-internet-of-things/>. [Citado nas páginas ix e 6]
- [5] M. ABDMEZIEM, D. Tandjaoui, and I. Romdhani, *Architecting the Internet of Things: State of the Art*, pp. 55–75. 08 2015. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/275352749_Architecting_the_Internet_of_Things_State_of_the_Art. [Citado na página 7]
- [6] SBRTechnologies, “Iot architecture,” Imagem disponível em <https://sbr-technologies.com/iot-architecture/>. [Citado nas páginas ix e 8]
- [7] G. P. Aditya Gaur, Bryan Scotney and S. McClean, *Smart City Architecture and its Applications Based on IoT*, pp. 1089–1094. 2015. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915009229>. [Citado na página 10]
- [8] A. Caragliu, C. Del Bo, and P. Nijkamp, “Smart cities in europe,” *VU University Amsterdam, Faculty of Economics, Business Administration and Econometrics, Serie Research Memoranda*, vol. 18, 01 2009. [Citado na página 10]
- [9] C. Facilitator, “Smart city – elements, features, technology and govt. approach.” Online. Imagem disponível em <https://constrofacilitator.com/>

- smart-city-elements-features-technology-and-govt-approach/. [Citado nas páginas ix e 10]
- [10] R. Giffinger, C. Fertner, H. Kramar, R. Kalasek, N. Milanović, and E. Meijers, *Smart cities - Ranking of European medium-sized cities*. 01 2007. [Citado na página 11]
- [11] M. Bernardo, *Smart City Governance: From E-Government to Smart Governance*, pp. 196–232. 01 2019. [Citado na página 11]
- [12] M. Yousef and E. Sayed Ali Ahmed, “Internet of things in smart environment: Concept, applications, challenges, and future directions,” *World Scientific News*, 07 2019. [Citado na página 11]
- [13] S. Tian, W. Yang, J. M. L. Grange, P. Wang, W. Huang, and Z. Ye, “Smart healthcare: making medical care more intelligent,” *Global Health Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 62–65, 2019. [Citado na página 11]
- [14] D. Marikyan, S. Papagiannidis, and E. Alamanos, “A systematic review of the smart home literature: A user perspective,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 138, pp. 139–154, 2019. [Citado na página 11]
- [15] C. Bıyık, A. Abareshi, A. Paz, R. A. Ruiz, R. Battarra, C. D. Rogers, and C. Lizarraga, “Smart mobility adoption: A review of the literature,” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 7, no. 2, 2021. [Citado na página 12]
- [16] M. Talebkhah, A. Sali, M. Marjani, M. Gordan, S. Hashim, and F. Rokhani, “Iot and big data applications in smart cities: Recent advances, challenges, and critical issues,” *IEEE Access*, 04 2021. [Citado nas páginas xiii e 12]
- [17] W. M. Organization, “The future of weather, climate, water: Across generations (world meteorological day, 2023),” 2023. Disponível em <https://public.wmo.int/en/resources/world-meteorological-day/future-of-weather-climate-water-across-generations-2023/21st-century>. [Citado na página 12]
- [18] R. G. Harrison, *Meteorological Measurements and Instrumentation*, vol. 10. Wiley, oct 2014. [Citado na página 13]
- [19] N. Corporation, “110-ws-25 modular weather stations.” Online. Imagem disponível em <https://novalynx.com/store/pc/110-WS-25-Modular-Weather-Stations-p1073.htm>. [Citado nas páginas ix e 13]

- [20] W. M. Organization, *Guide to Instruments and Methods of Observation*, vol. 3. 2021. Disponível em https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/wmo-no_8. [Citado nas páginas xiii, 14, 15, 16, 21 e 23]
- [21] D. Engineering, “Active hull cooling.” Online. Imagem disponível em <https://www.davis-eng.com/ahc.html>. [Citado nas páginas ix e 14]
- [22] P. System, “Fixed mooring buoys.” Online. Imagem disponível em <https://poseidon.hcmr.gr/components/observing-components/buoys>. [Citado nas páginas ix e 14]
- [23] A. G. B. of Meteorology, “Offshore automatic weather stations in the coral sea.” Online. Imagem disponível em <https://media.bom.gov.au/social/blog/627/our-offshore-automatic-weather-stations-in-the-coral-sea/>. [Citado nas páginas ix e 15]
- [24] N. W. Service, *Upper-air observations*. n.d. Disponível em <https://www.weather.gov/grb/ua>. [Citado na página 15]
- [25] Windy.APP, “Weather balloons definition and purposes.” Online. Imagem disponível em <https://media.bom.gov.au/social/blog/627/our-offshore-automatic-weather-stations-in-the-coral-sea/>. [Citado nas páginas ix e 16]
- [26] N. Aeronautics and S. Administration, “Goes-r spacecraft overview.” Online. Imagem disponível em <https://www.dnoticias.pt/2023/1/26/345826-temperaturas-negativas-no-pico-do-areeiro-pelo-terceiro-dia-consecutivo/>. [Citado nas páginas ix e 17]
- [27] Global Monitoring Laboratory, “Mauna Loa Observatory.” <https://gml.noaa.gov/obop/mlo/>, Accessed: 2023-04-22. [Citado na página 17]
- [28] N. Oceanic and A. Administration, “Carbon dioxide at noaa’s mauna loa observatory reaches new milestone: Tops 400 ppm,” 2013. [Citado nas páginas ix e 17]
- [29] W. M. Organization, “Wmo-cimo testbed hohenpeissenberg (germany),” Disponível em https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/cimo-testbeds-and-lead-centres/Testbed_Hohenpeissenberg. [Citado na página 18]
- [30] S. Nachrichten, “Besuch: Meteorologisches observatorium hohenpeissenber.” Online. Imagem disponível em <https://www.dnoticias.pt/2023/1/26/345826-temperaturas-negativas-no-pico-do-areeiro-pelo-terceiro-dia-consecutivo/>. [Citado nas páginas ix e 18]

- [31] “National report,” *International Association of Meteorological and atmospheric sciences IAMAS*, june 2003. Disponível em <https://iugg.org/wp-content/uploads/2022/03/portugal-iamas.pdf>. [Citado na página 19]
- [32] D. de Notícias, “Temperaturas negativas no pico do areeiro.” Online. Imagem disponível em <https://www.dnoticias.pt/2023/1/26/345826-temperaturas-negativas-no-pico-do-areeiro-pelo-terceiro-dia-consecutivo/>. [Citado nas páginas ix e 19]
- [33] M. Nau, *Electrical Temperature Measurement with thermocouples and resistance thermometers*. JUMO, Janeiro 2007. [Citado nas páginas 19 e 21]
- [34] G. K. McMillan, *Advanced Temperature Measurement and Control, Second Edition*. International Society of Automation, Outubro 2010. [Citado nas páginas ix e 20]
- [35] K. SIREN, G. ROSÉN, J. VAD, and P. V. NIELSEN, “12 - experimental techniques,” in *Industrial Ventilation Design Guidebook* (H. Goodfellow and E. Tähti, eds.), pp. 1105–1195, San Diego: Academic Press, 2001. [Citado na página 20]
- [36] H. does a mercury barometer function? Online. Imagem disponível em <https://homework.study.com/explanation/how-does-a-simple-mercury-barometer-function-how-does-it-show-pressure.html>. [Citado nas páginas ix e 21]
- [37] C.-Y. Lee and G.-B. Lee, “Humidity sensors: A review,” *Sensor Letters*, vol. 3, pp. 1–15, 01 2005. [Citado na página 22]
- [38] P. S. W. Center, “Measuring rain drizzle.” Online. Imagem disponível em <https://www.dnoticias.pt/2023/1/26/345826-temperaturas-negativas-no-pico-do-areeiro-pelo-terceiro-dia-consecutivo/>. [Citado nas páginas ix e 23]
- [39] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols and applications,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, p. Fourthquarter 2015, 11 2015. [Citado na página 23]
- [40] J. Ding, M. Nemati, C. Ranaweera, and J. Choi, “Iot connectivity technologies and applications: A survey,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 04 2020. [Citado nas páginas xiii, 24, 25 e 29]
- [41] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, “Internet of things (iot): A literature review,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, pp. 164–173, 04 2015. [Citado na página 24]

- [42] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, “A study of lora: Long range and low power networks for the internet of things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, 2016. [Citado na página 25]
- [43] T. things network. Online. Imagem disponível em <https://www.thethingsnetwork.org/community/porto/>. [Citado nas páginas ix e 25]
- [44] B. Foubert and N. Mitton, “Long-range wireless radio technologies: A survey,” *Future Internet*, vol. 12, no. 1, 2020. [Citado na página 26]
- [45] M. A. M. Almuahaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, and S. Abdulmalek, “A survey on lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions,” *Electronics*, vol. 11, no. 1, 2022. [Citado na página 26]
- [46] C. Bayılmış, M. A. Ebleme, Ünal Çavuşoğlu, K. Küçük, and A. Sevin, “A survey on communication protocols and performance evaluations for internet of things,” *Digital Communications and Networks*, vol. 8, no. 6, pp. 1094–1104, 2022. [Citado nas páginas ix, xiii, 26, 27, 28 e 30]
- [47] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols and applications,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, p. Fourthquarter 2015, 11 2015. [Citado na página 28]
- [48] J. Dizdarevic, F. Carpio, A. Jukan, and X. Masip, “A survey of communication protocols for internet of things and related challenges of fog and cloud computing integration,” *ACM Computing Surveys*, vol. 51, 04 2018. [Citado nas páginas xiii, 29 e 30]
- [49] E. Murdyantoro, R. Setiawan, I. Rosyadi, A. Nugraha, H. Susilawati, and Y. Ramadhani, “Prototype weather station uses lora wireless connectivity infrastructure,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1367, p. 012089, 11 2019. [Citado nas páginas ix, xiii e 31]
- [50] D. Saini, A. Thakur, S. Ahuja, N. Kumar, and N. Sabharwal, “Arduino based automatic wireless weather station with remote graphical application and alerts,” 02 2016. [Citado nas páginas ix, 32 e 33]
- [51] A. Devices, “Tmp35/tmp36/tmp37: Low voltage temperature sensors,” n.d. [Citado nas páginas xiii e 37]
- [52] STMicroelectronics, “Lm135/lm235/lm335: Precision temperature sensors,” n.d. [Citado nas páginas xiii e 37]
- [53] “Mouser electronics.” Website. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://pt.mouser.com/>. [Citado nas páginas xiii, 37, 38, 39, 40, 41, 45, 47 e 48]

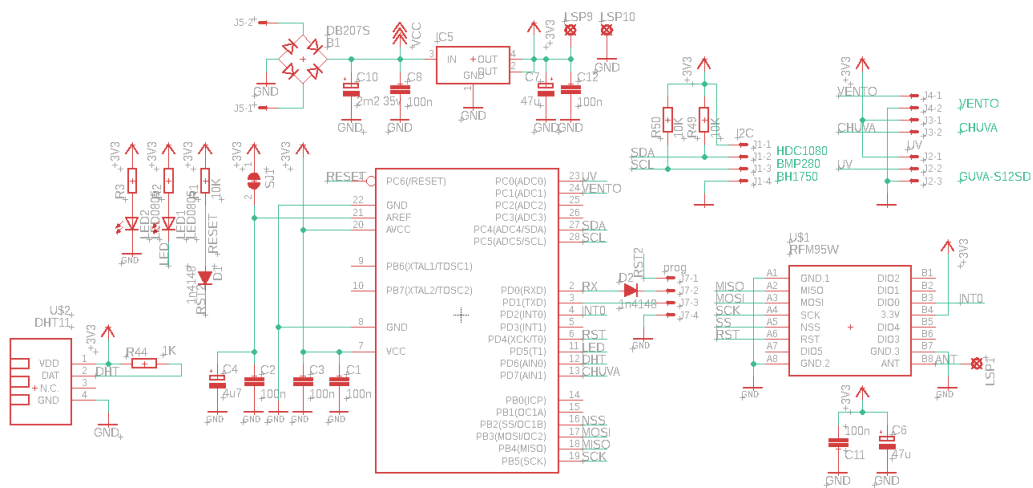
- [54] “Pt robotics.” Website. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.ptrobotics.com/>. [Citado nas páginas xiii, 37, 38, 39, 40, 41, 45, 47 e 48]
- [55] “Bot’n roll.” Website. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.botnroll.com/pt/>. [Citado nas páginas xiii, 37, 38, 39, 40, 41, 45, 47 e 48]
- [56] “Digi-key electronics.” Website. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.digikey.pt/>. [Citado nas páginas xiii, 37, 38, 39, 40, 41, 45, 47 e 48]
- [57] “Farnell.” Website. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://pt.farnell.com/>. [Citado nas páginas xiii, 37, 38, 39, 40, 41, 45, 47 e 48]
- [58] B. Sensortec, “Bmp180 digital pressure sensor.” Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 37]
- [59] B. Sensortec, “Bmp280 digital pressure sensor.” Datasheet, 2015. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/bmp280/>. [Citado nas páginas xiii e 37]
- [60] B. Sensortec, “Bme280 digital humidity, pressure, and temperature sensor.” Datasheet, 2015. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>. [Citado nas páginas xiii e 37]
- [61] M. Electronics, “Dht11 technical data sheet,” n.d. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 39]
- [62] Adafruit, “Digital humidity and temperature sensor dht22 datasheet,” n.d. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 39]
- [63] T. Instruments, “Hdc1080 low power, high accuracy digital humidity sensor with temperature sensor datasheet,” n.d. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1689356864772>. [Citado nas páginas xiii e 39]
- [64] STMicroelectronics, “HTS221: Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature,” n.d. Último Acesso a 13 de julho, 2023. Disponível em <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/hts221.html>. [Citado nas páginas xiii e 39]

- [65] A. Industries, “Guva-s12sd uv sensor breakout.” Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1918guva.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 40]
- [66] “Ultraviolet sensor uvm-30a.” Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://electropeak.com/learn/download/uvm30a-uv-sensor-module-datasheet/>. [Citado nas páginas xiii e 40]
- [67] B. Siepert, “Adafruit bh1750 ambient light sensor,” Última atualização em 2022. Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bh1750-ambient-light-sensor.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 41]
- [68] Adafruit Industries, “Adafruit ltr-329 light sensor.” Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ltr-329-ltr-303.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 41]
- [69] R. Semiconductor, “Bh1750 digital light sensor datasheet,” Última atualização em 2022. Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://www.farnell.com/datasheets/1813320.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 41]
- [70] “Wind speed sensor for weather stations,” 2023. Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://www.ebay.com/itm/334455726076>. [Citado nas páginas ix, xiii, 42 e 43]
- [71] “T8wf wh-sp-rg rain gauge,” 2023. Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em <https://pt.aliexpress.com/>. [Citado nas páginas x e 44]
- [72] A. Corporation, “Atmega328p datasheet.” Online. Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. [Citado nas páginas xiii e 45]
- [73] A. Corporation, “Atmega88/atmega168 datasheet.” Online. Último Acesso a 19 de julho, 2023. Disponível em https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-9365-Automotive-Microcontrollers-ATmega88-ATmega168_Datasheet.pdf. [Citado nas páginas xiii e 45]
- [74] STMicroelectronics, “Stm32f103x8 datasheet.” Online. Último Acesso a 20 de julho, 2023. Disponível em <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 45]
- [75] E. Systems, “Esp8266ex datasheet.” Online. Último Acesso a 21 de julho, 2023. Disponível em https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. [Citado nas páginas xiii e 46]

- [76] E. Systems, “Esp32 series datasheet.” Online. Último Acesso a 21 de julho, 2023. Disponível em https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Citado nas páginas xiii e 46]
- [77] R. P. Foundation, “Raspberry pi pico w datasheet.” Online. Último Acesso a 21 de julho, 2023. Disponível em <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 46]
- [78] HopeRF, “Low power long range transceiver module.” Online. Último Acesso a 21 de julho, 2023. Disponível em <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>. [Citado nas páginas x, xiii, 48, 59 e 60]
- [79] M. Technology, “Low-power long range lora® technology transceiver module.” Online. Último Acesso a 21 de julho, 2023. Disponível em <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/WSG/ProductDocuments/DataSheets/RN2903-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002390K.pdf>. [Citado nas páginas xiii e 48]
- [80] Eletrofun, “Bateria lítio 21700 3.7v.” Online. Último Acesso a 21 de julho, 2023. Disponível em <https://www.electrofun.pt/baterias-e-pilhas/bateria-litio-21700-37v-4000ma-35a-samsung>. [Citado nas páginas x e 49]
- [81] Shikues, “Bipolar linear regulator.” Online. Último Acesso a 01 de setembro, 2023. Disponível em https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2001081204_Shikues-AMS1117-1-2_C475600.pdf. [Citado nas páginas x e 53]
- [82] HopeRF, “Rfm95w.” Online. Último Acesso a 01 de setembro, 2023. Disponível em <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html>. [Citado nas páginas x e 53]
- [83] everythingRF, “What is spi?” Online. Último Acesso a 01 de setembro, 2023. Disponível em <https://www.everythingrf.com/community/what-is-spi>. [Citado nas páginas x e 53]

Anexo A

Esquema elétrico geral dos módulos secundários



Anexo B

PCB dos módulos secundários

