



Sensorização Ambiental e Caracterização do Meio em Cidades Inteligentes

FRANCISCO DE BRITO VASCONCELOS

novembro de 2021

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Sensorização Ambiental e Caracterização do Meio em Cidades Inteligentes

Francisco de Brito Vasconcelos

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



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Novembro, 2021

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 Sistemas Autónomos.

Candidato: Francisco de Brito Vasconcelos, N.º 1150947,
1150947@isep.ipp.pt

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

Empresa: CEiiA

Orientador: Tiago Macedo, tiago.macedo@ceiia.com

Coorientador: Hélder Covas Oliveira, helder.oliveira@ceiia.com



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

Novembro, 2021

Agradecimentos

A presente dissertação culmina de um conjunto de etapas de aprendizagem, empenho e procura pelo desconhecido. São imensos os intervenientes que participaram neste longo caminho que nunca terei oportunidade de agradecer. Portanto, seguem enumerados os agradecimentos aos que contactei de forma mais direta.

O primeiro agradecimento parte para a família, em especial para os meus pais, por todo o empenho e suporte que me deram ao longo de toda a vida, já que sem eles nunca alcançaria tal etapa.

Aos fantásticos amigos com a qual partilhei a vida académica e que me proporcionaram momentos irrepetíveis. Um agradecimento especial à Luciana, por toda a paciência e capacidade de escuta.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, e sobretudo ao Laboratório de Sistemas Autónomos pela incrível experiência de ensino que me proporcionaram.

Ao Engenheiro Lino Figueiredo, pela ajuda na etapa final do ciclo de estudos e na elaboração da presente dissertação.

Ao CEiiA, e a todos os elementos da equipa que pertença (Eletrónica e Sistemas Embebidos), sobretudo ao orientador Tiago Macedo, pelo apoio técnico/científico partilhado.

A todos os que de alguma forma entraram nesta caminhada, o meu sincero agradecimento!

Resumo

A fraca qualidade do ar, associada anualmente à ocorrência de milhões de mortes, traduz a necessidade de detetar e reportar concentrações de diferentes poluentes em ambientes citadinos. Neste âmbito, surge o desenvolvimento de uma plataforma de baixo custo, energeticamente independente, capaz de responder às necessidades de monitorização de diferentes parâmetros, disponibilizando os dados em tempo real.

A solução é baseada na construção de dois sistemas: a caixa de sensores que adquire e reporta os dados medidos, e o *gateway* que serve de ponte entre o dispositivo de monitorização e a *cloud*. A necessidade de ter consumos reduzidos e acesso constante aos dados medidos implica a utilização de um protocolo que responda a estes princípios, centrando-se no conceito de *Internet of Things* (IoT). O *gateway*, enquanto dispositivo dinâmico, comunica com qualquer estação de monitorização que respeite o protocolo de mensagens estabelecido, por meio uma comunicação de rádio LoRa, e conseqüentemente com um *broker* MQTT, por meio de ligação a uma rede de Internet local.

Foram construídos protótipos para cada sistema, a partir do desenvolvimento de *Printed Circuit Board* (PCB), e para validar a solução, foram analisados os resultados em diferentes vertentes: qualidade dos dados adquiridos, baixo consumo do sistema, capacidade de estar *stand-alone*, e o alcance da comunicação LoRa.

Palavras-Chave: sistema embebido; estação de monitorização; *gateway*; IoT; LoRa; MQTT

Abstract

Poor air quality, related to the annual occurrence of millions of deaths, exposes the need to detect and report different concentration of pollutants in city environments. Within this scope is the development of a stand-alone and low-cost platform, capable of monitoring several parameters in real time.

The product is based on the construction of two systems: the sensor box, which acquires and reports the measured data, and the gateway, that serves as a bridge between the monitoring device and the cloud. In order to have low consumption and constant access to measured data, it is necessary to use a protocol that responds to these principles, based on the Internet of Things (IoT) concept. The gateway, as a dynamic device, communicates with any monitoring station that respects the established message protocol, through LoRa radio communication, and consequently, with an MQTT broker through a local network.

Prototypes were built for each system from the designed PCB, and to validate the solution, the results of the different aspects were analyzed: quality of acquired data, system consumption, stand-alone capacity, and the reach of LoRa communication.

Keywords: embedded system; monitoring station; gateway; IoT; LoRa; MQTT

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Listagens	xv
Lista de Acrónimos	xvii
Lista de Símbolos	xxi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Empresa	2
1.4 Plano de Trabalho	3
1.5 Organização da Dissertação	3
2 Qualidade do Ar em Cidades Inteligentes	5
2.1 Cidades Inteligentes	5
2.2 Qualidade do Ar	8
2.2.1 Emissores de Poluentes	8
2.2.2 Fontes e Efeitos da Poluição Aérea	8
2.2.3 Contexto Europeu e Mundial	10
2.2.4 Contexto Nacional	11
2.2.5 Índice de Qualidade do Ar	11
2.3 Estações de Monitorização	12
2.3.1 Smart Citizen	12
2.3.2 Kunak Air Pro	14
2.3.3 Libelium Plug&Sense!	15
2.3.4 Resumo	16
3 Tecnologias de Comunicação	19
3.1 Redes de Comunicação IoT	20
3.1.1 ZigBee	21
3.1.2 Wi-Fi	21

3.1.3	LoRa	21
3.1.4	Sigfox	22
3.1.5	LTE-M	22
3.1.6	NB-IoT	22
3.1.7	Resumo	23
3.2	Protocolos de Comunicação IoT	23
3.2.1	CoAP	23
3.2.2	MQTT	24
3.2.3	XMPP	24
3.2.4	AMQP	24
3.2.5	Resumo	25
4	Arquitectura do Sistema	27
4.1	Arquitetura de <i>Hardware</i> - Estação	28
4.1.1	Microcontrolador	28
4.1.2	Sensores	29
4.1.3	<i>Individual Sensor Board</i>	30
4.1.4	Módulo de Conversão Analógico-Digital	31
4.1.5	Módulo de Comunicação LoRa	31
4.1.6	Sistema de Gestão de Energia	33
4.2	Arquitetura de <i>Hardware</i> - <i>Gateway</i>	36
4.3	Arquitetura de <i>Software</i> - Estação	37
4.4	Arquitetura de <i>Software</i> - <i>Gateway</i>	38
5	Implementação	41
5.1	Descrição do <i>Hardware</i> - Estação	41
5.1.1	<i>Board</i> Principal	41
5.1.2	<i>Board</i> de Interface	45
5.2	Descrição de <i>Hardware</i> - <i>Gateway</i>	46
5.3	Construção dos protótipos	46
5.4	Descrição de <i>Software</i> - Estação	49
5.4.1	Aquisição sensorial	50
	BME680 e AM2315	50
	Sensores Eletroquímicos	50
	Material Particulado	52
	Estação Meteorológica	53
5.4.2	Protocolo de Mensagens LoRa	54
5.4.3	Máquina de Estados Finita	55
	<i>Power Off</i>	55
	<i>Check Memory</i>	56
	Aquisição de Dados	58

Transmissão	60
Receção de Dados	61
5.5 Descrição de <i>Software - Gateway</i>	62
5.5.1 Configuração da Comunicação	62
5.5.2 Modo de Operação	63
5.6 Interface Gráfica	66
6 Resultados	69
6.1 Consumo do sistema de monitorização	69
6.2 Produção energética	71
6.3 Alcance da comunicação	73
6.3.1 Meio urbano	73
6.3.2 Meio rural	76
6.4 Aquisição de Dados	78
6.4.1 Teste 1	78
6.4.2 Teste 2	80
6.4.3 Teste 3	84
7 Conclusões e Trabalho Futuro	87
Referências	89
A Caracterização dos Sensores	99
B Consumo energético previsto nos diferentes modos de operação	101
C Esquemáticos - Estação de Monitorização	103
D Tabelas de Estados - Estação de Monitorização	107
E Parâmetros dos Sensores Eletroquímicos	111

Lista de Figuras

1.1	Representação da distribuição do plano de trabalhos	3
2.1	Investimento em tecnologia no âmbito das <i>smart cities</i>	6
2.2	Casos de uso em <i>smart cities</i>	7
2.3	Contribuição setorial nas emissões de poluentes na Europa em 2018 .	8
2.4	Concentração horária de NO, NO ₂ e <i>Particulate Matter</i> (PM) ₁₀ na estação de monitorização João Gomes Laranjo (Matosinhos)	11
2.6	Soluções comercializadas pela <i>Smart Citizen</i>	13
2.5	Diferentes módulos do sistema <i>Smart Citizen</i>	14
2.7	Air Pro - Solução comercial desenvolvida pela Kunak	15
2.8	Libelium Plug&Sense!	16
3.1	Dispositivos IoT ativos em todo o mundo	20
4.1	Arquitetura geral do sistema	27
4.2	Arquitetura de <i>hardware</i> do sistema de monitorização do meio	28
4.3	ISB - Alphasense	31
4.4	ADS1115 (em <i>board</i> de desenvolvimento) - Módulo de conversão analógico- digital	32
4.5	<i>Pin mapping</i> do módulo de rádio RFM95W	32
4.6	Relação entre o SF e o tempo de "viagem" no módulo de rádio LoRa	33
4.7	Comportamento horário do sistema de monitorização	34
4.8	Esquema geral de alimentação dos diferentes módulos	34
4.9	Sistema de gestão de energia do sistema - DFR0535	36
4.10	Arquitetura de <i>hardware</i> do <i>gateway</i>	37
4.11	Arquitetura de <i>software</i> da estação	38
4.12	Arquitetura de <i>software</i> do <i>gateway</i>	39
5.1	<i>Pin mapping</i> do regulador de tensão do microcontrolador	42
5.2	BSS138 - <i>level shifter</i>	43
5.3	Divisor de tensão de 5 V para 3,3 V	44
5.4	PCB principal da estação - lado superior	44
5.5	PCB principal da estação - lado inferior	45
5.6	PCB de interface da estação	45

5.7	PCB do <i>gateway</i>	46
5.8	<i>Board</i> principal do sistema em <i>stack</i> com a placa de <i>power management</i>	47
5.9	Protótipo da caixa principal do sistema de monitorização	47
5.10	Protótipo da caixa secundária do sistema de monitorização	48
5.11	Protótipo da estação de monitorização completa	49
5.12	Protótipo do <i>gateway</i>	49
5.13	Mensagem enviada pela estação meteorológica	54
5.14	Processo de transmissão e receção da dados a partir do módulo de rádio LoRa	56
5.15	Máquina de estados - Estação	57
5.16	Mensagem (de <i>keepalive</i> ou bateria baixa) enviada pelo módulo	60
5.17	Trama de dados enviada pelo módulo	61
5.18	Exemplo de trama enviada pelo <i>gateway</i>	62
5.19	Demonstração da publicação de dados dos <i>devices</i> no <i>broker</i>	65
5.20	Interface gráfica de visualização dos parâmetros ambientais em tempo real	67
6.1	Consumo do sistema ao longo de um ciclo de funcionamento	70
6.2	Consumo de cada modo do sistema	70
6.3	Sistema de testes para análise da produção energética do sistema	71
6.4	Produção horária da potência do sistema	72
6.5	Comparação entre a potência de saída do painel e a corrente da bateria	73
6.6	Pontos de teste da comunicação LoRa num meio urbano	74
6.7	Pontos de teste da comunicação LoRa num meio rural	77
6.8	Sistema a recolher dados junto à estação de monitorização João Gomes Laranjo em Matosinhos	78
6.9	Comparação entre as diferentes concentrações medidas no primeiro teste	79
6.10	Comparação entre as diferentes concentrações medidas no primeiro teste	80
6.11	Comparação das concentrações de O ₃ medidas pelas duas estações	81
6.12	Comparação do valor médio horário da concentração de O ₃	82
6.13	Variação da temperatura e da humidade no exterior	82
6.14	Variação da concentração de CO no segundo teste	83
6.15	Variação da temperatura e da humidade no decorrer do teste 3	84
6.16	Variação da concentração de O ₃ calculada a partir das diferentes equações	85
6.17	Variação de CO e Dióxido de Nitrogénio (NO ₂) no teste 3	86

C.1	Esquemático da <i>board</i> principal - microcontrolador e respetivo <i>hardware</i> , módulo de rádio LoRa, divisor de tensão da bateria e entrada fixa de tensão a partir do conector micro-USB	104
C.2	Esquemático da <i>board</i> principal - ADC's, <i>level shifters</i> e conetores	105
C.3	Esquemático da <i>board</i> de interface	106

Lista de Tabelas

2.1	Máxima concentração de poluentes estabelecida em contexto europeu e mundial	10
2.2	Qualificação da qualidade do ar, segundo o <i>Air Quality Index</i> (AQI), em $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12
2.3	Comparação dos diferentes sistemas de monitorização	17
3.1	Comparação característica das diferentes tecnologias	23
3.2	Comparação dos diferentes protocolos de comunicação	25
4.1	Comparação entre a duração expectável do sistema em função da capacidade da bateria	35
5.1	Designação dos diferentes conectores da PCB principal	42
5.2	Protocolo de mensagens com o sensor de PM (Honeywell)	53
5.3	Caracterização da mensagem enviada pela estação meteorológica (SEN0186)	54
5.4	Parâmetros configuráveis do sistema recebidos pelo módulo de rádio LoRa e armazenados na EEPROM	61
6.1	Resultado da comunicação LoRa a partir de diferentes pontos urbanos	75
6.2	Resultado da comunicação LoRa a partir de diferentes pontos rurais	77
6.3	Comparação entre a concentração média e o desvio médio de O_3 nos diferentes ambientes	85
A.1	Sensores de qualidade do ar e as suas características	100
B.1	Consumo previsto de cada um dos componentes do sistema. Cinzento - Inativo; Verde - Ativo; Salmão - <i>Deep Sleep</i>	102
D.1	Descrição do estado de <i>power off</i> - Máquina de estados	107
D.2	Descrição do estado de <i>check memory</i> - Máquina de estados	108
D.3	Descrição do estado de aquisição de dados - máquina de estados	108
D.4	Descrição do estado de transmissão - máquina de estados	108
D.5	Descrição do estado de receção de dados - máquina de estados	109
E.1	Algoritmos sugeridos pelo fabricante dependendo do sensor	111
E.2	Fatores de compensação de temperatura dos sensores utilizados	112

Listagens

5.1	Estrutura de parâmetros comuns a todos os sensores	58
5.2	Estrutura de dados do sistema	59
5.3	Estrutura de dados do <i>gateway</i>	64
5.4	Estrutura de dados do sistema de monitorização	65

Lista de Acrónimos

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AE	<i>Auxiliary Electrode</i>
AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i>
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AQI	<i>Air Quality Index</i>
AQMD	<i>Air Quality Management District</i>
CA	<i>Certificate Authority</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CO	Monóxido de Carbono
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DTLS	<i>Datagram Transport Layer Security</i>
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memories</i>
ENAR	Estratégia Nacional para o Ar
FIFO	<i>First In First Out</i>
FOTA	<i>Firmware Over-The-Air</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>

I/O	<i>Input/Output</i>
I²C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IC	<i>Integrated Circuit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISB	<i>Individual Sensor Board</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
JSON	<i>Java Script Object Notation</i>
LDO	<i>Low-Dropout</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LSE	<i>Low Speed External</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machines</i>
LwT	<i>Last Will and Testament</i>
MCU	<i>Microcontroller</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MQTT	<i>Message Queue Telemetry Transport</i>
NB-IoT	<i>Narrow-Band IoT</i>
NO	Monóxido de Nitrogénio
NO₂	Dióxido de Nitrogénio
NO_x	Óxidos de Nitrogénio

O₃	Ozono
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PM	<i>Particulate Matter</i>
ppm	<i>Parts per Million</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RTC	<i>Real-Time Clock</i>
SASL	<i>Simple Authentication and Security Layer</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SI	Sistema Internacional
SN	<i>Serial Number</i>
SO₂	Dióxido de Enxofre
SoC	<i>State of Charge</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SSL	<i>Secure Sockets Layer</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	União Europeia
UNB	<i>Ultra-Narrow-Band</i>
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>

USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USB-C	<i>Universal Serial Bus Type-C</i>
WE	<i>Working Electrode</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WWAN	<i>Wireless Wide Area Network</i>
XMPP	<i>Extensible Messaging and Presence Protocol</i>

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
AE_0	AE <i>sensor zero</i>	mV
AE_e	AE <i>eletronic offset</i>	mV
WE_0	WE <i>sensor zero</i>	mV
WE_e	WE <i>eletronic offset</i>	mV

Capítulo 1

Introdução

A Organização Mundial de Saúde (OMS) estima que, no ano de 2016, a poluição aérea causou a morte a cerca de 7 milhões de pessoas [1]. Para contrariar esta tendência surgiram, ao longo das últimas décadas, inúmeras iniciativas com o objetivo de monitorizar a qualidade do ar, tendo em conta que o estado deste está intrinsecamente associado a problemas de saúde e à ocorrência de mortes prematuras [2][3]. Surge, neste âmbito, o desenvolvimento de uma solução capaz de detetar e reportar a concentração de diferentes poluentes em ambiente citadino. O contexto em que esta se insere e o processo de desenvolvimento são explorados na presente dissertação.

1.1 Contextualização

Este projeto surge da necessidade do CEiiA desenvolver e validar à escala-piloto, uma plataforma digital de cidades inteligentes para modelação e planeamento urbano, tendo por base diferentes fontes (clima e comportamentos de grupos de utilizadores). Neste âmbito, é proposto o desenvolvimento de uma solução de baixo custo, capaz de responder às necessidades de monitorização da qualidade do ar, identificando concentrações de compostos gasosos e de fatores ambientais que os condicionem. Pretende-se que a identificação destes promova a diminuição da pegada carbónica tendo em conta que, só a fraca qualidade do ar na cidade do Porto causa a morte de pelo menos 229 pessoas por ano (valor mais alto em Portugal) [4].

As soluções existentes, tanto a nível nacional como internacional, têm um elevado custo e são de grande dimensão. Urge, portanto, a carência de um sistema caracteristicamente contrário aos atuais mas que garante a alta resolução e fiabilidade dos dados adquiridos, sendo facilmente instalado em qualquer local (não dependendo de alimentação da rede elétrica) para aumentar a área monitorizada.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação recai sobre o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorizar a qualidade do ar e disponibilizar os dados obtidos em tempo real. A solução deverá basear-se em três vertentes: qualidade dos dados medidos, isto é, a precisão da medição das concentrações gasosas e dos fatores ambientais condicionantes; no alcance da comunicação entre o *end-device* e a *cloud*, e na durabilidade do sistema, ou seja, na capacidade deste para operar sem fornecimento de energia proveniente da rede elétrica.

A medição da concentração de determinados poluentes presentes na camada troposférica e dos fatores ambientais externos que influenciem diretamente a medição (*e.g.* temperatura, humidade, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento) são o objetivo primordial da solução. A necessidade de acesso aos dados medidos obriga à implementação de um protocolo de comunicação entre o dispositivo e a *cloud*, centrando-se no conceito de *Internet of Things* (IoT), ou seja, apresentando um baixo consumo energético, um custo reduzido e um longo alcance. A comunicação deve ser bi-direcional, isto é, o dispositivo de monitorização deve também estar recetivo a configurações por parte de um utilizador. Por último, um dos fatores preponderantes do sistema é ser *stand-alone*, isto significa ser energeticamente sustentável e não depender da rede elétrica para operar, garantindo assim a facilidade de instalação em qualquer local/área. Para tal, é necessário recorrer a uma fonte de energia renovável e a uma bateria recarregável para alimentar o sistema.

1.3 Empresa

O CEiiA, fundado em 1999 e situado em Matosinhos, desenvolve e opera produtos em diferentes áreas: mobilidade (automóvel e urbana), aeronáutica, mar e espaço. Apresenta uma filosofia baseada na sustentabilidade ambiental e é uma referência a nível nacional pela liderança em diferentes projetos de valor.

A solução desenvolvida e apresentada nesta dissertação enquadra-se nos valores da empresa pelo panorama que representa. O autor insere-se na equipa de eletrónica e sistemas embebidos da instituição, equipa esta que também opera no desenvolvimento de sistemas autónomos em diferentes áreas de atuação.

1.4 Plano de Trabalho

De forma a organizar as diferentes etapas de desenvolvimento do sistema e da dissertação, é traçado o plano de trabalhos realizado, que se subdivide em 7 fases: estado de arte, planeamento da arquitetura do sistema, implementação da solução, testes de bancada, testes de campo, apresentação dos resultados e escrita da dissertação. A representação cronológica, presente na Figura 1.1, dispõe da duração de cada etapa ao longo do período de desenvolvimento.

	2020			2021									
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Estado da Arte													
Planeamento da arquitetura do Sistema													
Implementação da Solução													
Testes de Bancada													
Testes de Campo													
Apresentação de Resultados													
Dissertação													

Figura 1.1: Representação da distribuição do plano de trabalhos

1.5 Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos para facilitar a compreensão da descrição dos diferentes desenvolvimentos da solução.

Depois do capítulo introdutório, é apresentado o estado de arte que se divide em dois capítulos: o primeiro (capítulo 2) expõe o conceito de cidades inteligentes, o tipo de poluentes que as instituições nacionais e internacionais obrigam a monitorizar, e o tipo de estruturas semelhantes que existem; o segundo (capítulo 3) descreve os tipos de comunicação existentes com análises comparativas.

No capítulo 4 são descritas as arquiteturas de alto nível dos diferentes periféricos que compõe o sistema, ao nível da especificação de *hardware* e *software*.

O capítulo 5 aborda a implementação do sistema com a descrição detalhada dos diferentes módulos.

O capítulo 6 apresenta o resultado e discussão dos diferentes testes efetuados.

Por fim, o último capítulo resume as conclusões obtidas e expõe as melhorias e propostas futuras do projeto.

Capítulo 2

Qualidade do Ar em Cidades Inteligentes

A necessidade crescente em reduzir a quantidade de emissores poluentes emerge o desenvolvimento de soluções capazes de os identificar. Estas soluções permitem discernir problemas citadinos e conseqüentemente um crescimento sustentável. Este capítulo apresenta os diferentes poluentes, sistemas capazes de os quantificar, assim como o contexto em que este tipo de soluções é desenvolvido.

2.1 Cidades Inteligentes

O crescimento da população mundial a residir em ambientes citadinos tem aumentado nas últimas décadas. Estima-se que no início do século *XX*, apenas 10% residia em meios urbanos, tendo este valor atingido a marca dos 50% no ano de 2007 [5]. A previsão, de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU) é de que, em 2050, cerca de 68% da população mundial viva em cidades [6]. Este crescimento impõe inúmeros desafios às cidades, incluindo uma gestão sustentável e o desenvolvimento de áreas urbanas que garantam qualidade de vida a quem nelas habita. O conceito de *smart cities* (cidades inteligentes) surge como um meio para alcançar os objetivos anteriormente descritos.

A aposta no desenvolvimento de soluções no âmbito das *smart cities* têm crescido nos últimos anos, suportadas quer por organizações governamentais (como é o caso da Comissão Europeia), quer pelo setor privado. Este investimento tecnológico foi

de cerca de 104,3 bilhões de dólares no ano 2019 e a previsão é que, segundo a Statista, em 2023 estarão disponíveis cerca de 189,5 bilhões de dólares para apoiar o desenvolvimento de *smart cities* [7].

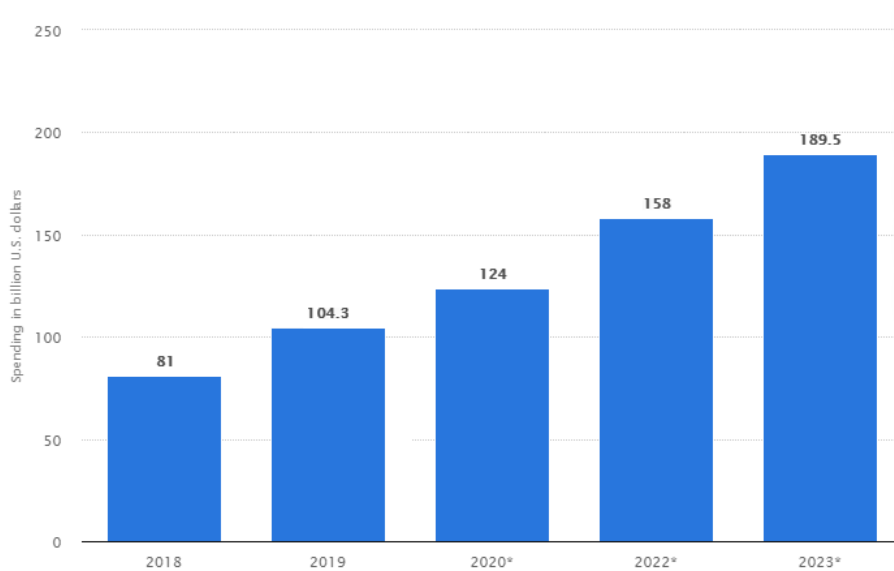


Figura 2.1: Investimento em tecnologia no âmbito das *smart cities* [7]

O recente investimento em tecnologia na área das *smart cities* permitiu o desenvolvimento de dispositivos e aplicações capazes de atuar, sem intervenção humana, em diferentes contextos (Figura 2.2) [8]:

- Habitação - residências que possuam dispositivos ligados à Internet, que permitam o controlo de luzes, estores, televisões, entre outros. A implementação de casas inteligentes tem como objetivo partilhar e controlar o estado da habitação e otimizar os consumos energéticos;
- Saúde - dispositivos capazes de rastrear atividades diárias e registar diferentes aspetos da saúde de um utilizador, como é o caso dos batimentos cardíacos, oximetria (nível de oxigénio no sangue), entre outros. Este tipo de dispositivos, quando conectados à rede, permitem que os dados obtidos sejam analisados por médicos ou por utilizadores autorizados;
- Mobilidade - dispositivos e serviços usados para melhorar a rede de transportes numa cidade, desde a apresentação de lugares de estacionamento disponíveis à oferta de soluções que melhorem ou reduzam o trânsito;
- Vigilância - dispositivos de monitorização como câmaras inteligentes, capazes de recolher e analisar dados em tempo real, de forma a evitar a ocorrência de situações perigosas, como é o caso de crimes e incêndios;

- Agricultura - a aplicação de dispositivos na agricultura é usualmente dividida em quatro categorias: monitorização, documentação, previsão e controlo. A monitorização consiste na deteção de diversos parâmetros relacionados com o solo (humidade), rega (pH e salinidade), clima (temperatura, humidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento), armazenamento (temperatura e humidade) e com o ambiente (contaminação e emissão). A documentação consiste no registo e análise dos dados recolhidos. A previsão implica diferentes métodos analíticos para prever eventos concretos. O controlo consiste na atuação do sistema, sendo os sistemas de rega um dos exemplos [9];
- Ambiente - a implementação de sistemas inteligentes capazes de monitorizar o estado do ambiente tem surgido ao longo dos últimos anos em diversas áreas: qualidade da água (medições de temperatura, turbidez, condutividade, salinidade e pH); qualidade do ar (monitorização de diversos poluentes presentes na troposfera); clima (temperatura, humidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento); e na gestão de resíduos [10].



Figura 2.2: Casos de uso em *smart cities* (adaptado de [8])

2.2 Qualidade do Ar

Um dos problemas crescentes nos meios urbanos e que, de forma indireta, afeta alguns dos casos de uso descritos na Figura 2.2 é a poluição aérea, resultante do intenso tráfego em áreas densamente povoadas, da alta industrialização e consequentemente do elevado consumo de energia [11]. A exposição a longo prazo a um ambiente poluído pode ter um impacto significativo na qualidade de vida do ser humano, resultando em doenças respiratórias, doenças cardiovasculares e alergias [12].

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) categoriza os poluentes que são emitidos ou precursores destes, da qual se destacam os seguintes: material particulado, internacionalmente definido como PM, os Óxidos de Nitrogénio (NO_x), o Ozono (O_3), o Dióxido de Enxofre (SO_2), o Monóxido de Carbono (CO) e os Compostos Orgânicos Voláteis (COV) [12].

2.2.1 Emissores de Poluentes

O setor dos transportes é o que mais contribui para as emissões de poluentes aéreos - entre o transporte rodoviário e não-rodoviário, que inclui o transporte aéreo, ferroviário, marítimo e fluvial. É seguido pelo setor residencial, comercial e institucional que consome grande parte da energia; pelo setor da energia, que inclui a produção e processamento de combustível e a produção de energia; pelo setor industrial, seguido do setor agrícola e por fim, o setor da gestão de resíduos, que inclui o tratamento de águas residuais (Figura 2.3) [12].

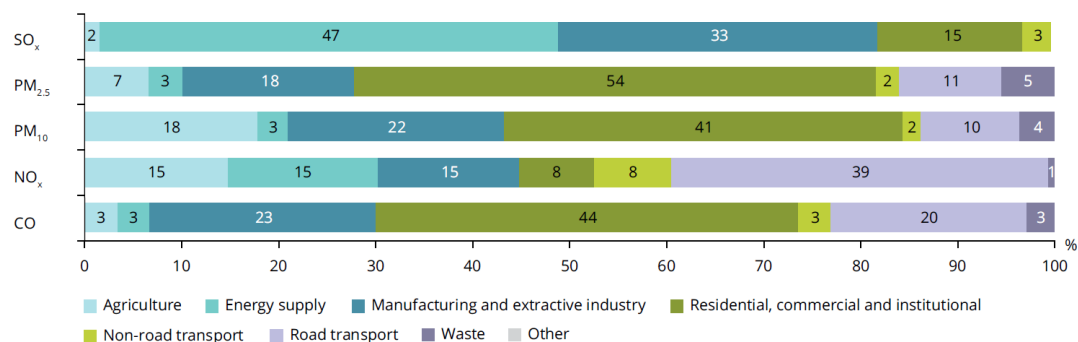


Figura 2.3: Contribuição setorial nas emissões de poluentes na Europa em 2018 (adaptado de [12])

2.2.2 Fontes e Efeitos da Poluição Aérea

Os poluentes presentes na troposfera são emitidos por diferentes fontes e têm diferentes efeitos na saúde do ser humano:

- Material particulado - é um indicador comum na poluição aérea sendo que, entre os restantes poluentes, é o mais prejudicial. Consiste em material sólido ou líquido que fica suspenso no ar e é composto por ácidos (nitratos e sulfatos), químicos orgânicos, metais, partículas do solo e substâncias alérgicas. Cerca de 90% da constituição do material particulado advém das partículas diesel dos motores automóveis. É usualmente dividido em duas categorias: $PM_{2.5}$ que consiste em partículas com diâmetro inferior a $2,5 \mu m$ e PM_{10} que consiste em partículas com diâmetro inferior a $10 \mu m$. A exposição a grandes concentrações foi identificada como a causa do aumento de problemas respiratórios e doenças cardiovasculares crônicas, da diminuição da função pulmonar e do aumento de mortes prematuras [13];
- Óxidos de nitrogénio - são um grupo de gases que incluem o Monóxido de Nitrogénio (NO) e o Dióxido de Nitrogénio (NO_2). O primeiro é um precursor do segundo através da oxidação (processo de perda de eletrões por um átomo) deste, enquanto que o segundo é libertado na atmosfera principalmente por veículos movidos a combustíveis fósseis [14], sendo que os transportes rodoviários são os que mais contribuem para a exposição da população ao poluente (representam mais de 80% das emissões do setor dos transportes), sobretudo em áreas urbanas [12]. Os efeitos da sua inalação podem ser responsáveis por agravamentos do sistema respiratório, nomeadamente em crianças asmáticas e estão associados à morte por cancro do pulmão [15] [16]. A presença de NO_2 na troposfera pode formar outros poluentes que também apresentam efeitos negativos para a saúde, sendo que a sua monitorização possibilita a previsão da existência destes;
- Ozono - ao nível do solo (troposférico), diferente do que ocorre naturalmente na estratosfera, é um dos principais constituintes da poluição fotoquímica. É formado a partir da reação de óxidos de nitrogénio e de COV, na presença de radiação solar e temperaturas elevadas. Geralmente, surge em altas concentrações durante o verão sendo que o principal responsável é o setor dos transportes, uma vez que é a partir deste que os gases referidos são emitidos [14]. É capaz de causar problemas respiratórios, desencadear asma e reduzir a função pulmonar [17];
- Dióxido de enxofre - é um gás incolor e com um forte odor. A sua emissão está maioritariamente associada à indústria (47% das emissões totais - Figura 2.3) que utiliza combustível fóssil. Os seus efeitos encontram-se associados a doenças respiratórias (bronquite crónica ou asma) e cardiovasculares. É um dos gases que contribui para as chuvas ácidas, que têm como consequência a acidificação dos meios naturais ou a corrosão de materiais metálicos [18];

- Monóxido de carbono - A maioria das emissões deste resulta da combustão, sobretudo do setor dos transportes (queima de combustíveis fósseis) e do setor residencial, comercial e institucional, através do uso, por exemplo, de aquecedores e fogões a gás [19]. A sua inalação em grandes concentrações está associada a dores de cabeça, tonturas, náuseas, fadiga e falta de ar, podendo provocar a morte por envenenamento; em baixas concentrações pode ser gravoso para indivíduos com problemas cardíacos e pode provocar problemas neurológicos [18, 20];
- COV - contém uma mistura complexa de centenas de gases e são emitidos sobretudo pelo setor dos transportes [21]. Estes emitem compostos que libertam benzeno, tolueno, xileno e estireno [14]. São de especial preocupação, uma vez que contêm carbono na sua estrutura molecular e desta forma sofrem reações fotoquímicas na presença de radiação solar.

2.2.3 Contexto Europeu e Mundial

No decorrer das últimas décadas, as organizações europeias e mundiais têm desenvolvido medidas no sentido de reverter os efeitos catastróficos das alterações climáticas. No ano de 2008, a União Europeia (UE) emitiu uma diretiva (2008/50/CE) obrigando os estados membros a efetuar medições à qualidade do ar [22]. Em 2015, com o acordo de Paris, todos os países acordaram limitar ou reduzir a emissão global de gases com efeito de estufa [23]. Mais recentemente, em 2019, a UE lançou o Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) com o mesmo objetivo do acordo de Paris. Um dos domínios deste pacto está relacionado com a eliminação da poluição e consequente monitorização da qualidade do ar [24]. Neste âmbito, a UE e a OMS impuseram limites máximos de concentração de cada poluente, sendo que estes encontram-se presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Máxima concentração de poluentes estabelecida em contexto europeu e mundial (adaptado de [12, 25])

Poluente	Período	Concentração UE	Concentração OMS
PM _{2.5}	Horário	N/D	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Anual	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM ₁₀	Diário	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Anual	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	8 horas	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	Horário	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Anual	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO ₂	Horário	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	N/D
	Diário	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	8 horas	10 mg/m^3	10 mg/m^3

2.2.4 Contexto Nacional

Em Portugal, a entidade responsável pela qualidade do ar é a APA que, além de acompanhar a estratégia europeia (referida na secção anterior), elaborou em 2016 a Estratégia Nacional para o Ar (ENAR), com o objetivo de fortalecer planos de melhoria da qualidade do mesmo [26]. A mesma entidade é responsável pelo desenvolvimento de uma plataforma, QualAr, que centraliza os dados obtidos por estações fixas oficiais em território nacional. O sistema disponibiliza, além dos dados horários medidos pelas diversas estações, previsões da qualidade do ar para diferentes localidades. Um dos exemplos encontra-se na Figura 2.4, onde se concentram os dados horários de 3 poluentes (NO, NO₂ e PM₁₀) no último dia do ano 2019, medidos por uma das estações do concelho de Matosinhos (disponibilizados pela QualAr). Esta análise permite observar elevadas concentrações dos óxidos de nitrogénio, sobretudo em horários caracterizados pelo elevado trânsito, sendo os veículos movidos a combustíveis fósseis um dos emissores comuns deste tipo de poluente [14].

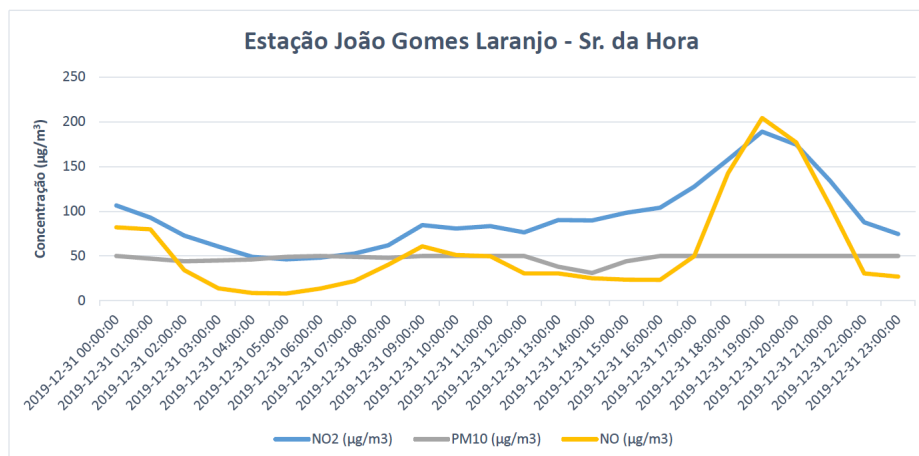


Figura 2.4: Concentração horária de NO, NO₂ e PM₁₀ na estação de monitorização João Gomes Laranjo (Matosinhos)

2.2.5 Índice de Qualidade do Ar

As organizações referidas na secção 2.2.3 desenvolveram índices de qualidade do ar com o objetivo de apresentar as concentrações dos poluentes de uma forma qualitativa. Este índice, denominado de AQI, é dividido em 6 níveis e é calculado de acordo com a concentração dos seguintes poluentes: PM_{2,5}, PM₁₀, O₃, NO₂ e SO₂ [27]. Na Tabela 2.2 encontra-se a relação entre a concentração de cada poluente com a respetiva avaliação qualitativa.

Tabela 2.2: Qualificação da qualidade do ar, segundo o AQI, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (adaptado de [27])

Classificação	PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃	NO ₂	SO ₂
Muito Bom	0-10	0-20	0-50	0-40	0-100
Bom	11-20	21-40	51-100	41-90	101-200
Moderado	21-25	41-50	101-130	91-120	201-350
Medíocre	26-50	51-100	131-240	121-230	351-500
Muito mau	51-75	101-150	241-380	231-340	501-750
Extremamente mau	76-800	151-1200	381-800	341-1000	751-1250

2.3 Estações de Monitorização

Nas últimas anos, o investimento público e privado em sistemas de monitorização da qualidade do ar foi avultado. Na Europa, a Comissão Europeia surge com um dos catalisadores do desenvolvimento deste tipo de sistemas, dirigindo mais de 89 milhões de euros através do programa *Horizon 2020*, que vigorou entre 2014 e 2020 [28]. Deste investimento (público e privado) surgiram estações fixas e móveis de monitorização de diversos parâmetros ambientais que são apresentadas no decorrer deste sub-capítulo.

2.3.1 Smart Citizen

O *Smart Citizen* é uma plataforma que tem como objetivo a integração de cidadãos com a comunidade científica e educativa em prol da monitorização ambiental. O sistema desenvolvido é aberto, tanto a nível de *hardware* como de *software* (o código fonte é disponibilizado) e os dados recolhidos são apresentados para a comunidade através de uma plataforma *online* [29].

Foram desenvolvidas duas soluções no âmbito deste projeto que se baseiam no princípio da modularidade: o *smart citizen kit* composto por um número limitado de sensores e a *smart citizen station* projetada para situações mais complexas que incluem a medição da quantidade de determinado poluente. Como assentam no mesmo princípio, foram desenvolvidos módulos aplicáveis aos diferentes contextos (Figura 2.5). A *smart citizen station* inclui-os na totalidade e estes são compostos por [29]:

- *Data Board* - É a placa principal e inclui: dois microcontroladores, um SAMD21 para o processamento de dados e um ESP8266 (que contém um módulo Wi-Fi) para comunicação com a *cloud*, um *slot* para um cartão micro-SD que armazena os dados quando a transmissão destes não é possível, comunicações

analógicas e digitais para/com as restantes *boards*; fornecimento de energia e um sistema de carregamento de baterias;

- *Urban Board* - Permite a medição de parâmetros de natureza ambiental, tais como: temperatura, humidade relativa, pressão atmosférica, nível de ruído, intensidade luminosa, o total de compostos orgânicos voláteis (tVOC) e o dióxido de carbono equivalente (eCO₂). Comunica com a placa principal através do protocolo *Inter-Integrated Circuit* (I²C) e inclui uma entrada para o sensor de PM que é utilizada pelo *kit*;
- *PM Sensor Board* - À semelhança da placa principal, é composta por um microcontrolador SAMD21 que gere uma ampla variedade de conexões e adquire dados relativos ao material particulado. Estes dados são reportados por sensores PMS 5003 da Plantower que comunicam através do protocolo *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART).
- *Gas Pro Board* - Permite a medição da concentração de três poluentes diferentes: monóxido de carbono, dióxido de enxofre e sulfeto de hidrogénio (H₂S). O sinal de saída dos três sensores eletroquímicos da Alphasense, que medem esta concentração, é analógico e o envio destes dados é efetuado através do protocolo I²C para a *PM sensor board*, que serve como intermediária entre a placa principal e esta.

O *smart citizen kit* é composto por apenas duas *boards*: a principal (*data board*) e a *urban board* à qual é conectado o sensor de PM. Na Figura 2.6 encontram-se as duas soluções comercializadas.



(a) *Smart Citizen kit*



(b) *Smart Citizen station*

Figura 2.6: Soluções comercializadas pela *Smart Citizen* [30]

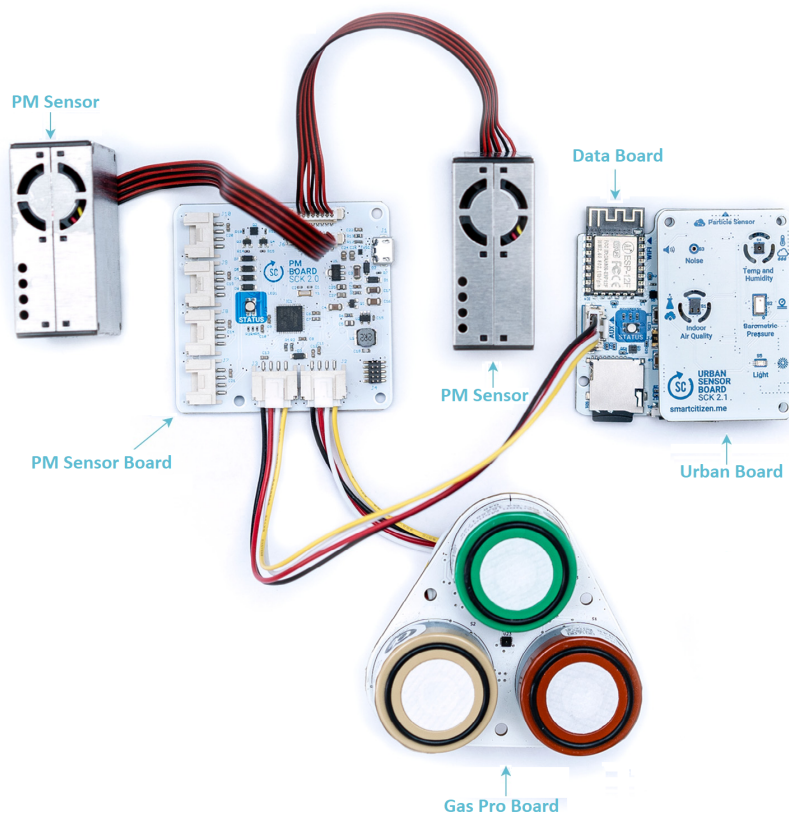


Figura 2.5: Diferentes módulos do sistema *Smart Citizen* [29]

2.3.2 Kunak Air Pro

A Kunak é uma empresa espanhola, sediada em Navarra, e comercializa soluções no âmbito da monitorização ambiental. Atualmente são financiados em mais de 1,5 milhões de euros pela Comissão Europeia, através do programa *Horizon 2020*, num projeto que iniciou em 2018 e que se baseia no desenvolvimento e globalização das soluções desenvolvidas no contexto da qualidade do ar [31].

Até ao momento, a solução mais completa disponível para compra é o modelo Air Pro (Figura 2.7). Apresenta um custo entre 3000 e 7500 euros, sendo que varia dependendo dos parâmetros escolhidos para medição. O sistema é composto por sensores que recolhem dados de natureza ambiental, como é o caso da temperatura, humidade relativa, pressão atmosférica e o ruído. No contexto de poluentes, é equipado com contadores de partículas (PM_1 , $PM_{2.5}$ e PM_{10}) e permite a medição de cinco dos seguintes poluentes: CO, CO₂, NO, NO₂, O₃, SO₂, H₂S, amoníaco (NH₃) e COVs. Permite ainda a adição de um anemómetro e de um pluviómetro. A comunicação entre a *box* e a *cloud* é bi-direcional (através de um *embedded SIM* (eSIM) ou *ethernet*) e os dados são apresentados ao utilizador na plataforma desenvolvida pela empresa [32].

Este produto destaca-se no mercado pelo elevado grau de precisão dos dados



Figura 2.7: Air Pro - Solução comercial desenvolvida pela Kunak [32]

adquiridos comparando-os com estações oficiais de avultado valor. Esta análise tem por base um parâmetro estatístico, o coeficiente de determinação (R^2). Este valor, que varia entre 0 e 1, é, neste contexto, sinónimo da qualidade da medição adquirida, uma vez que traduz a relação linear entre os dados medidos pelos sensores e os valores de referência [33]. Um R^2 próximo de 1 reflete uma correlação praticamente perfeita, sendo que esta é uma das características da solução desenvolvida pela Kunak.

2.3.3 Libelium Plug&Sense!

A Libelium possui uma larga gama de produtos inerentes às *smart cities*, com aplicações na maioria dos casos referidos na Figura 2.2: ambiente (qualidade do ar e da água), agricultura, mobilidade e segurança. Apresentam dois produtos modulares no contexto da qualidade do ar: *Smart Environment PRO* e o *Smart Cities PRO*. Estes produtos integram os diferentes *kits* comercializados pela empresa e apenas diferem na medição de alguns parâmetros, sendo o *Smart Cities PRO* o mais completo (Figura 2.8) [34].

Este produto é composto por três módulos:

- Principal - onde é incluído o módulo de comunicação (e.g. LoRaWAN, Sigfox, ZigBee, Wi-Fi, GPRS ou NB-IoT, que são descritos no capítulo seguinte), seis



Figura 2.8: Libelium Plug&Sense! [34]

sensores que medem a concentração de determinado poluente (na qual se destacam o NO, NO₂, CO, O₃, SO₂ e o H₂S), sensores para recolha de dados ambientais (temperatura, humidade, pressão atmosférica e intensidade luminosa) e o respetivo *hardware*, onde é incluído o microcontrolador (ATmega1281);

- Material particulado - contém um contador ótico de partículas, o modelo OPC-N3 da Alphasense, que permite a medição de PM com diferentes dimensões (1, 2.5 e 10 micrómetros);
- Ruído - inclui um sensor de medição do nível de ruído, para monitorizar os níveis acústicos do local onde o sistema for instalado.

Os *kits*, na qual a solução anteriormente descrita é incluída, também envolvem um painel solar para fornecimento de energia e um *gateway* para intermediar a ligação entre o módulo principal e a *cloud*.

2.3.4 Resumo

As principais características dos produtos mencionados nas secções 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3, encontram-se presentes na Tabela 2.3. O sistema *Smart Citizen*, sendo *open-source*, apresenta vantagens em relação aos restantes por ser adaptável a diferentes contextos. Contudo, apresenta limitações a nível de comunicação (a ligação Wi-Fi é adequado para habitações) e de alimentação. Os restantes, por serem soluções

comerciais, apresentam aspetos fundamentais como é o caso da alta resolução dos sensores e a modularidade dos protocolos de comunicação e dos parâmetros a monitorizar.

Tabela 2.3: Comparação dos diferentes sistemas de monitorização

Produto	Poluentes	Protocolo de Comunicação	Alimentação	Custo (€)
Smart Citizen	CO, H ₂ S, SO ₂ , PM _{2.5} , eCO ₂ , tVOC, temperatura e humidade	Wi-Fi	Bateria e rede elétrica	ND
Kunak Air Pro	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , H ₂ S, NH ₃ , COVs, PM ₁ , PM _{2.5} e PM ₁₀	GPRS, Ethernet	Bateria e painel solar	3000-7000
Libelium Plug&Sense!	CO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , H ₂ S, temperatura, humidade, pressão atmosférica, intensidade luminosa, PM ₁ , PM _{2.5} e PM ₁₀	LoRaWAN, Sigfox, ZigBee, Wi-Fi, GPRS ou NB-IoT	Bateria e painel solar	ND

Capítulo 3

Tecnologias de Comunicação

O conceito de *smart cities*, apresentado no capítulo 2, carece da permanente atualização do estado dos dispositivos, isto é, que estes estejam ligados à Internet sendo assim capazes de se identificarem na rede e de comunicarem entre si. Esta necessidade de partilha constante define o termo *Internet of Things*, referido pela primeira vez em 2006, num artigo que descreve o paradigma da evolução. Desde então, e até 2018, foram publicados 26420 artigos que contêm o acrónimo IoT como palavra chave, sinónimo do crescimento da tecnologia [35]. Este crescimento é igualmente notório na quantidade de dispositivos IoT ativos, tendo em conta que, segundo a Statista, em 2020 foram contabilizados quase 10 biliões (Figura 3.1). A tendência de crescimento manter-se-á nos próximos anos, prevendo um total de 21,5 biliões de dispositivos IoT ativos no ano de 2025 [36].

O conceito é, fisicamente, dividido em dois tipos de dispositivos e consequentemente em duas categorias distintas. O mais comum, o *edge node* consiste no dispositivo de baixo custo, composto por um microcontrolador que normalmente controla os atuadores, adquire dados e reporta-os. O segundo dispositivo, o *gateway* serve de ponte entre o *edge node* e a *cloud*. Desta relação surgem duas categorias: a rede de comunicação (entre o *edge node* e o *gateway*) e o protocolo de comunicação (entre o *gateway* e a *cloud*) [8]. Estas categorias são apresentadas de forma detalhada nas secções seguintes.

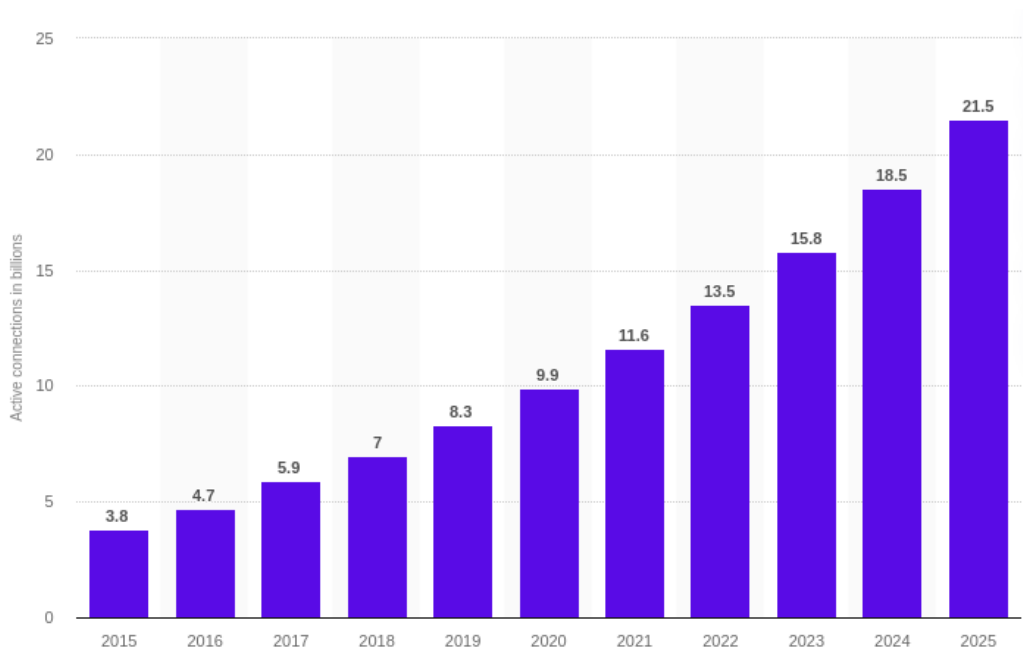


Figura 3.1: Dispositivos IoT ativos em todo o mundo [36]

3.1 Redes de Comunicação IoT

Ao longo dos últimos anos foram desenvolvidas diferentes tecnologias que permitem a partilha de dados entre dispositivos e servidores. A caracterização destas tem por base o alcance, escalabilidade (capacidade de ser expandida), taxa de transmissão, consumo energético e o custo. A aplicabilidade da tecnologia depende intrinsecamente destes parâmetros [37].

Os diferentes tipos de comunicação sem fio são vulgarmente divididos em três categorias, tendo como base o alcance: a tecnologia *Wireless Personal Area Network* (WPAN) é indicada para comunicações de curto alcance, como é o caso do *bluetooth*; para alcances superiores (entre 100 m a 1 km) surge a tecnologia *Wireless Local Area Network* (WLAN), utilizada em aplicações domésticas; em contextos superiores surge a *Wireless Wide Area Network* (WWAN), composta pelas comunicações móveis (rede móvel) e pela *Low Power Wide Area Network* (LPWAN). A LPWAN consiste num termo genérico para categorizar comunicações de longo alcance, com baixo consumo energético e de custo reduzido. Estas comunicações são ainda divididas em duas categorias: LPWAN licenciada e LPWAN não licenciada, sendo que esta opera no espetro das frequências *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) [38]. As tecnologias que se destacam nas referidas categorias (WPAN, WLAN e WWAN) são apresentadas nas secções seguintes.

3.1.1 ZigBee

O ZigBee é uma tecnologia que, à semelhança do *Bluetooth*, tem um curto alcance (100 m) e desta forma é categorizada como WPAN. Desenvolvida pela ZigBee Alliance a partir de 2001 e apresentada em 2003, abrange uma ampla variedade de aplicações IoT em contexto residencial. Baseada no padrão *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.15.4, opera globalmente a uma frequência de 2,4 GHz e permite taxas de transmissão de 250 kbps. Suporta duas topologias para a conexão de dispositivos (estrela e *mesh*), sendo que estes são definidos da seguinte forma: coordenador, capacitado para coordenar as ações numa rede; *routers* para permitirem a troca de mensagens; e os *end-devices* (dispositivos finais) que apenas comunicam com o coordenador ou com o *router*, nunca diretamente com outro dispositivo [38] [39].

3.1.2 Wi-Fi

O Wi-Fi é das tecnologias mais utilizada na categoria WLAN e é baseada no padrão IEEE 802.11. Opera nas frequências de 2.4 GHz e 5 GHz, suportando taxas de transmissão até 600 Mbps e têm um alcance típico entre 50 a 100 metros. Em 2017 foi lançado o protocolo IEEE 802.11ah, denominado Wi-Fi HaLow, desenvolvido no âmbito da IoT. Este opera em bandas não licenciadas (sub-1 GHz) e destaca-se pelo baixo consumo energético, maior largura de banda e um alcance superior (1 km) comparativamente à tecnologia Wi-Fi utilizada no dia a dia [38].

3.1.3 LoRa

A tecnologia *Long Range* é a camada física desenvolvida e patenteada pela Semtech. É baseada na técnica de modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) e opera nas bandas de frequência ISM: 433, 868 e 915 MHz, dependendo da localização geográfica. A tecnologia permite o ajuste de alguns parâmetros, como é o caso do *spreading factor* (grau de alargamento do espetro) e da largura de banda, que influenciam diretamente as taxas de transmissão, o consumo energético e a robustez. É caracterizada pelo baixo consumo de energia e pelo longo alcance (próximo dos 15 km em meios rurais), sendo por isto considerada uma LPWAN [38].

Em 2015 surgiu o protocolo de comunicação baseado em *Long Range* (LoRa), o LoRaWAN, padronizado pela LoRa-Alliance e que opera sobre a camada física. Este protocolo permite a comunicação entre diversos dispositivos e o *gateways* da rede. Os dispositivos LoRaWAN suportam comunicações bidirecionais e são divididos em três tipos de classes: os Classe A são os que consomem menos energia e apenas dispõem de dois curtos períodos, um para transmissão seguida de outro para a receção de mensagens; os Classe B incluem as características da classe anterior e permitem a adição calendarizada de períodos para receção de mensagens; os dispositivos Classe C estão

constantemente recetivos a mensagens o que os torna energeticamente dispendiosos [40].

3.1.4 Sigfox

O Sigfox é, à semelhança da tecnologia LoRa, uma rede LPWAN que opera no espectro de frequências não licenciadas. Utiliza uma largura de banda muito estreita, *Ultra-Narrow-Band* (UNB), de apenas 100 Hz que permite um baixo nível de ruído e uma ampliação do alcance da comunicação (10 km em ambiente urbano e 50 km em ambiente rural). Em contrapartida, dispõe de uma taxa de transmissão reduzida de apenas 100 bps e limita as comunicações *up-link* a 140 por dia [38]. Contudo, a sua aplicação destaca-se em contextos em que o consumo energético e a quantidade de dados a reportar é reduzido e o longo alcance é desejado.

3.1.5 LTE-M

Baseada na rede móvel, o *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) é uma rede LPWAN que opera nas frequências licenciadas e consiste numa versão simplificada da *Long Term Evolution* (LTE), conhecida por 4G. Diferencia-se da versão principal pela: redução do consumo de energia, extensão do alcance e diminuição da largura de banda (de 20 MHz para 1,4 MHz). Suporta comunicações *full-duplex* e *half-duplex* (é opcional e permite a redução do consumo energético) e permite atualizações de *Firmware Over-The-Air* (FOTA) [40]. Uma das grandes vantagens é a possibilidade da tecnologia coexistir com as redes LTE existentes, ou seja, utilizar o *hardware* da rede existente e desta forma reduzir custos de implementação [38].

3.1.6 NB-IoT

O *Narrow-Band IoT* (NB-IoT) é, à semelhança do *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M), uma rede LPWAN e uma derivação do LTE. Utiliza uma largura de banda estreita (200 kHz), e consequentemente uma taxa de transmissão reduzida, o que impossibilita atualizações por *Firmware Over-The-Air* (FOTA) [40]. A tecnologia tem três modos de operação: *in-band*, que significa utilizar um ou mais blocos de recursos físicos do prestador de serviços (LTE); *standalone*, que garante que a tecnologia pode ser implementada em um ou múltiplos sistemas móveis, como é o caso dos *Global System for Mobile Communication* (GSM); *guard-band*, que permite utilizar blocos de recursos físicos não utilizados pela LTE. Apenas suporta comunicações *half-duplex*, tem um alcance de 1 km em meios urbanos e de 10 km em meios rurais e à semelhança das tecnologias descritas nas secções anteriores, apresenta um consumo energético reduzido [38].

3.1.7 Resumo

A Tabela 3.1 apresenta um resumo das principais características que compõe as tecnologias mencionadas nas secções anteriores. A escolha desta depende das necessidades do projeto a implementar, ou seja, não há nenhuma tecnologia que se evidencia das restantes. Quando o requisito é o alcance, as que operam nas frequências ISM não licenciadas (LoRa e Sigfox) destacam-se mas, em contrapartida, quando o requisito abrange a taxa de transmissão são notórias as características das tecnologias *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) e NB-IoT.

Tabela 3.1: Comparação característica das diferentes tecnologias [38]

Tecnologia	Frequência	Largura de Banda	Taxa de Transmissão Máxima	Alcance
Zigbee	2.4 GHz	12 MHz	250 kbps	100 m
Wi-Fi HaLow	900 MHz	1/2 MHz	2 Gbps	1 km
LoRa	ISM não licenciada	125/250 kHz	50 kbps	5 km (urbano) 20 km (rural)
Sigfox	ISM não licenciada	100 Hz	100 bps	10 km (urbano) 50 km (rural)
LTE-M	LTE licenciada	1.4 MHz	1 Mbps	10 km
NB-IoT	LTE licenciada	200 kHz	250 kbps	1 km (urbano) 10 km (rural)

3.2 Protocolos de Comunicação IoT

No conceito de IoT, a comunicação é dividida em dois grupos: entre dispositivos e entre um dispositivo e a Internet. O primeiro consiste maioritariamente entre dispositivos e *gateways* e foi abordado no sub-capítulo anterior. O segundo consiste na comunicação entre o *gateway* e a *cloud*. Para satisfazer esta necessidade, foram desenvolvidos diferentes protocolos com características distintas, quer a nível de segurança, desempenho e método [41]. Esta análise é apresentada nas secções seguintes.

3.2.1 CoAP

O *Constrained Application Protocol* (CoAP) foi desenvolvido para ser aplicado em ambientes com recursos limitados e é adaptado do *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). Opera sobre o protocolo de transporte *User Datagram Protocol* (UDP) e é baseado no modo *Representational State Transfer* (REST) que inclui as técnicas de *POST*, *GET*, *PUT* e *DELETE*. Utiliza uma arquitetura do tipo pedido/resposta e para garantir a segurança durante a troca de mensagens entre o cliente e o servidor, utiliza o protocolo *Datagram Transport Layer Security* (DTLS), que é baseado no

Transport Layer Security (TLS) sobre UDP. Uma das desvantagens do protocolo é apenas suportar comunicação *one-to-one*, ou seja, não permite o envio de mensagens simultaneamente para diferentes destinatários [42].

3.2.2 MQTT

O protocolo *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT), inicialmente desenvolvido pela *International Business Machines Corporation* (IBM) e atualmente gerido pela OASIS, é um protocolo baseado em *Transmission Control Protocol* (TCP) e utiliza uma arquitetura *publish/subscribe*. Esta arquitetura tem por base três elementos, o publicador, o subscritor e o *broker*, sendo que este atua como intermediário, ou seja, faz a gestão de mensagens entre os dispositivos. Este protocolo utiliza três níveis de *Quality of Service* (QoS) que garantem que as mensagens entre o publicador e o subscritor são entregues: no máximo uma vez; pelo menos uma vez; e exatamente uma vez [43]. Apresenta três vantagens destacáveis como é o caso do baixo consumo de: memória, largura de banda e energia [42].

3.2.3 XMPP

O *Extensible Messaging and Presence Protocol* (XMPP) é um conjunto de tecnologias *open-source* desenvolvido para ser uma alternativa aos serviços fechados de troca de mensagens da época (surgiu no ano 2000). É utilizado para mensagens instantâneas, chamadas de voz e de vídeo, sincronização e pesquisa de dados, entre outros. Não possui mecanismos de segurança na especificação do protocolo mas permite a utilização de alguns na implementação do mesmo: TLS para encriptar as mensagens e *Simple Authentication and Security Layer* (SASL) para fornecer autenticações à comunicação. É vantajoso por apresentar uma arquitetura multifacetada, ou seja, é do tipo pedido/resposta e *publish/subscribe* [41].

3.2.4 AMQP

O *Advanced Message Queuing Protocol* (AMQP) é um protocolo *open-source*, sendo o seu desenvolvimento orientado à troca de mensagens. À semelhança do MQTT, opera sobre a camada de transporte TCP, utiliza os mesmos níveis de QoS e a sua arquitetura é baseada nos mesmos elementos (publicador, subscritor e *broker*). Contudo, permite a distribuição das mensagens em filas de mensagens, tendo por base a sua prioridade, garantindo capacidade no armazenamento das mesmas no caso de interrupções na rede [42]. À semelhança do *Extensible Messaging and Presence Protocol* (XMPP), utiliza TLS para encriptar as mensagens e SASL na autenticação.

3.2.5 Resumo

A Tabela 3.2 apresenta as principais características dos protocolos mencionados nas secções transatas. A performance de cada um, em diferentes contextos (*e.g.* latência, consumo energético e segurança), está intrinsecamente associada aos atributos que os compõe. A camada de transporte é um dos casos associados à latência, destacando-se, pela negativa, os protocolos que operam sobre TCP (MQTT, XMPP e AMQP) em comparação com os que operam sobre UDP. Em relação à segurança, destacam-se os que usam TLS em relação ao DTLS, uma vez que este é mais susceptível a ataques por ser tolerante a erros [44].

Com base na maturidade e estabilidade do protocolo, o MQTT é considerado pela maioria dos autores o que apresenta melhor desempenho e maior facilidade de implementação, (tendo também em conta a comunidade *online* e documentação existente) [44].

Tabela 3.2: Comparação dos diferentes protocolos de comunicação

Protocolo	Estilo de Arquitetura	Mensagem	Camada de Transporte	QoS (níveis)	Distribuição de Dados	Segurança
CoAP	Cliente/Servidor	Pedido/Resposta	UDP	2	<i>One-to-one</i>	DTLS
MQTT	<i>Broker</i>	<i>Publish-Subscribe</i>	TCP	3	<i>One-to-one</i> <i>One-to-many</i>	TLS/SSL
XMPP	Cliente/Servidor	Pedido/Resposta <i>Publish-Subscribe</i>	TCP	Não existe	<i>One-to-one</i> <i>One-to-many</i>	TLS/SASL
AMQP	<i>Broker</i>	<i>Publish-Subscribe</i>	TCP	3	<i>One-to-one</i> <i>One-to-many</i>	TLS/SASL

Capítulo 4

Arquitectura do Sistema

O desenvolvimento de um sistema capaz de recolher e reportar dados do meio centra-se em dois produtos: a estação de monitorização e o *gateway*. Com base nas necessidades destes e nas tecnologias descritas no capítulo 3, foi projetada a arquitetura de alto nível do sistema (Figura 4.1). O dispositivo principal (estação de monitorização) é composto por: unidade de *power*, que recolhe e distribui energia ao sistema; módulo de sensores para recolha dos dados; e por um módulo LoRa para transmissão dos mesmos. O *gateway*, como serve de intermediário entre o *broker* e a estação de monitorização, necessita de ligação à Internet para gerir o envio/receção de pedidos através do protocolo de mensagens MQTT e por conseguinte, de um módulo LoRa para comunicar com o dispositivo. A escolha do módulo de rádio LoRa como meio de comunicação entre sistemas deve-se à relação de baixo consumo e médio alcance que o caracterizam.

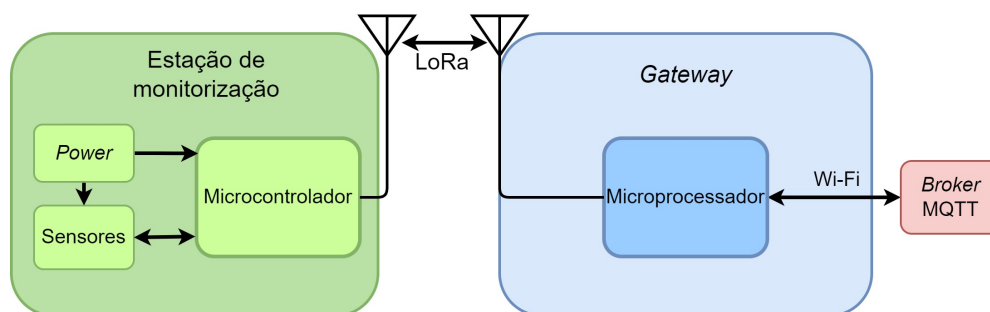


Figura 4.1: Arquitectura geral do sistema

4.1 Arquitetura de *Hardware* - Estação

O dispositivo de recolha de dados do meio foi projetado para recolher um elevado conjunto de parâmetros ambientais (Figura 4.2). A unidade principal do sistema é composta pelo *Microcontroller* (MCU) que adquire e envia os dados recolhidos. A alimentação do mesmo parte de uma fonte renovável (solar) que permite o carregamento das baterias e, quando possível, sustenta os restantes periféricos. As secções seguintes caracterizam de forma detalhada os diferentes módulos que compõe a estação.

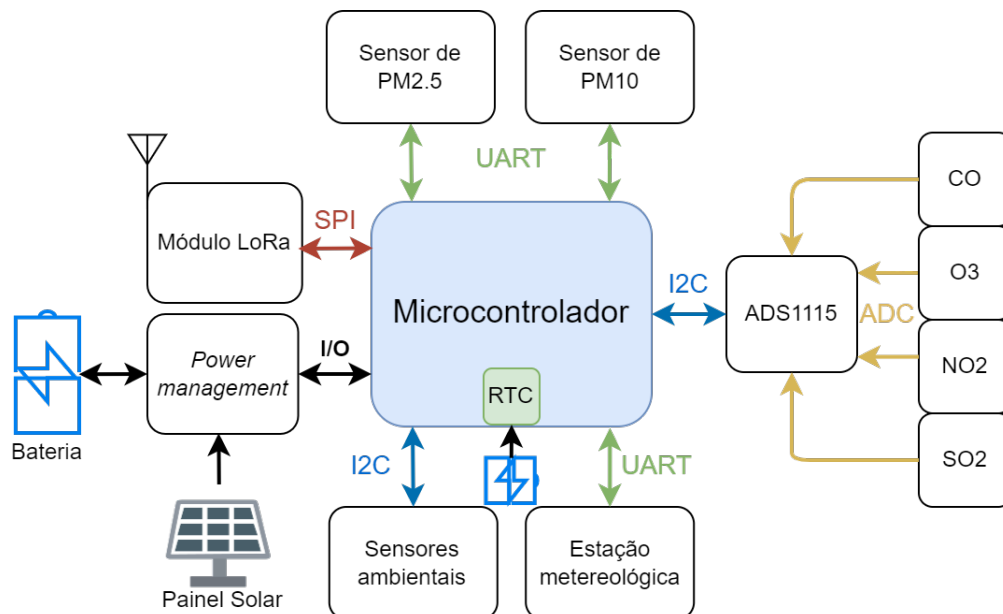


Figura 4.2: Arquitetura de *hardware* do dispositivo de monitorização do meio

4.1.1 Microcontrolador

O microcontrolador de 32-*bits* escolhido pertence à família de baixo consumo da STMicroelectronics e é designado de STM32L476RG. Estes têm diversos modos de operação (que variam em consumo e na quantidade de periféricos ativos), um *Real-Time Clock* (RTC) (com uma bateria própria) que permite aceder à hora atual e definir alarmes para acordar o sistema, três canais de *Serial Peripheral Interface* (SPI), três de I²C, cinco *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (USART), um de *Controller Area Network* (CAN), dezassete *timers*, entre outros. O fabricante comercializa um *board* (Nucleo-L476RG) para facilitar a integração (em ambiente de desenvolvimento) na qual está inserido o MCU. Esta é composta por conetores *arduino*, botões de *reset* e de estado, *Light Emitting Diode* (LED) de *status*

e um programador ST-Link com uma porta COM virtual por *Universal Serial Bus* (USB).

4.1.2 Sensores

O sucesso da implementação de uma solução de monitorização ambiental depende intrinsecamente da qualidade dos sensores que a compõe. Neste contexto, foram selecionados dois tipos de sensores para medição da concentração dos poluentes: óticos que, através da emissão de um feixe de luz e da deteção do feixe resultante, calculam a concentração de partículas; e eletroquímicos, que permitem medir a concentração de um gás através de uma corrente elétrica [45].

A oferta do mercado é limitada e nesse sentido foi necessário avaliar de forma exaustiva as soluções que garantissem resultados fiáveis e com alta resolução. O *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia reuniu, num estudo publicado em 2019, a performance de 110 sensores de baixo custo para monitorização da qualidade do ar [33], sendo que a avaliação presente no mesmo tornou-se essencial na construção da solução descrita na presente dissertação. A avaliação baseia-se sobretudo em três aspetos: custo; método de calibração; e no coeficiente de determinação (R^2). O último traduz a qualidade da medição (entre 0 e 1 ou em termos percentuais) através de um modelo estatístico, ou seja, relaciona a quantidade de medidas de determinado sensor que estão em concordância com a referência através de uma regressão linear [33]. Com base na análise descrita e nos relatórios disponibilizados pela *Air Quality Management District* (AQMD) (baseiam-se no mesmo modelo estatístico) foi elaborada a Tabela A.1 presente no Anexo A, que dispõe dos sensores que permitem quantificar o respetivo poluente. Nela estão presentes as características mais relevantes de cada um: protocolo de comunicação, resolução, intervalo de medição, coeficiente de determinação, e o custo. A partir deste *trade-off* foram selecionados os sensores para os diferentes parâmetros. Para a medição do material particulado ($PM_{2.5}$ e PM_{10}) foram incluídos dois modelos da Honeywell (HPMA1150S0) e para os restantes gases (CO, O_3 , NO_2 e SO_2) foram selecionados os modelos da Alphasense: CO-B4, OX-B431, NO_2 -B43F e SO_2 -B4, respetivamente. É de notar que cada um destes (sensores eletroquímicos) é composto por quatro elétrodos [46]:

- *Working Electrode* (WE) - é onde a oxidação ou redução dos gases tóxicos pode ser medida, sendo que este está exposto ao ar, em contacto direto com todos os gases, incluindo o que está a ser medido;
- *Auxiliary Electrode* (AE) - tem as mesmas características do anterior mas está inserido num eletrólito e desta forma não está em contacto com o gás alvo. Por estar isolado das condições externas, é usado como referência para as medidas obtidas;

- *Counter Electrode* - equilibra a reação do WE caso este oxide o gás, reduzindo outra molécula para gerar uma corrente equivalente no sentido contrário. Um exemplo disso acontece com o CO quando é oxidado no WE, uma vez que o oxigênio será reduzido no *counter electrode*;
- *Reference Electrode* - garante o potencial eletroquímico do WE para que este opere nas condições ideais, isto é, para manter uma sensibilidade constante, linear e uma sensibilidade mínima aos gases interferentes.

Estes terminais são conectados a uma *board* específica do fabricante, *Individual Sensor Board* (ISB), que consiste num potenciômetro de baixo ruído que aumenta a resolução e sensibilidade dos dados (descrito na secção seguinte) [47].

A qualidade dos dados obtidos por sensores de baixo custo (eletroquímicos e óticos) é, em alguns casos, questionável, sobretudo quando estes são comparados com os de estações convencionais de monitorização [48]. Há diferentes fatores (internos e externos) que influenciam as medições: a calibração inicial do fabricante (no caso dos eletroquímicos), a interferência de outros compostos gasosos e as variações de humidade relativa, temperatura e velocidade do vento [48] [49]. Com base nestes fatores, torna-se essencial a monitorização destes parâmetros para permitir compreender a sua influência na medição dos poluentes. Foram incluídos na solução sensores ambientais (comunicam através do protocolo I²C): o sensor AM2315 para monitorização da temperatura e humidade relativa; e o BME680 para medição da pressão atmosférica. Para monitorização da velocidade e direcção do vento foi incluída uma estação meteorológica (modelo SEN0186), que permite também medir a pluviosidade, a temperatura, a humidade e a pressão atmosférica (sendo estes últimos utilizados na medição no interior da estação de monitorização, por se encontrarem na *board* do fabricante).

4.1.3 *Individual Sensor Board*

A inclusão dos sensores eletroquímicos acresce a inclusão de *hardware* para melhorar a aquisição sensorial tendo em conta a sensibilidade dos periféricos em causa. Neste sentido, o fabricante comercializa soluções (Figura 4.3), que variam consoante o sensor, para melhorar a qualidade dos dados medidos. No conector são ligados 4 pinos: de alimentação da placa (5V e GND), OP1+ que corresponde ao WE, e OP2+ ao AE. Os pinos de OP1- e OP2- estão internamente ligados ao GND do circuito. A *board* contém um amplificador operacional para fornecer corrente ao *counter electrode* e dois amplificadores (para o WE e AE) de dois canais, sendo o primeiro canal de transimpedância de alto ganho e o segundo um *buffer*. Como a sensibilidade dos sensores é elevada, o fabricante fornece os parâmetros de fábrica que permitem otimizar os dados recolhidos (são utilizados no processamento): os *offsets* (tolerância) de tensão dos dois canais (WE e AE) (em mV), o ganho (em

mV/nA), a tensão inicial (*zero voltage*) no vazio (em mV) e a sensibilidade (em mV/ppb).

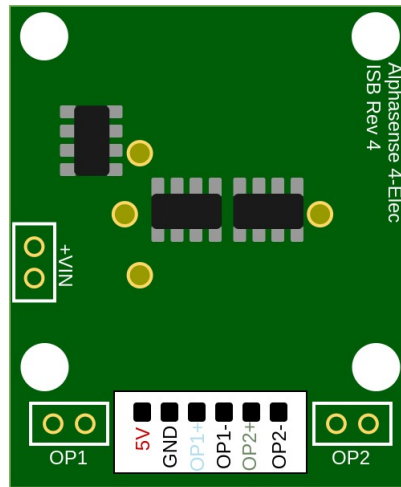


Figura 4.3: ISB - Alphasense

4.1.4 Módulo de Conversão Analógico-Digital

A precisão e a veracidade dos dados recolhidos neste tipo de soluções são fundamentais para validar o produto desenvolvido. Os sensores eletroquímicos selecionados (que medem os compostos gasosos) são extremamente sensíveis a pequenas concentrações, apresentando sensibilidades inferiores a 0,5 mV/ppb. Urge assim a inclusão de um *Analog-to-Digital Converter* (ADC) com elevada resolução. Esta carência surge porque a resolução do ADC do microcontrolador selecionado (STM32L476RG) é de 12 bits e o valor máximo de leitura é de 3,3 V. Como a saída dos sensores analógicos pode ser superior à permitida pelo STM32 seria necessário incluir *hardware (logic level converters)* para converter a saída de 5V para 3,3V. Como este processo implica a redução de resolução de leitura e a inclusão de *hardware*, foi necessário encontrar um *Integrated Circuit* (IC) para preencher os requisitos mencionados. A solução consiste na integração do módulo ADS1115 (Figura 4.4) que contém um ADC de 16 bits com quatro canais de leitura e que permite ler valores analógicos até uma tensão superior à da alimentação (entre 2 V e 5,5 V). O protocolo entre o IC e o microcontrolador é I²C e a implementação deste está limitado a quatro unidades por solução, uma vez que é o número de endereços possíveis [50].

4.1.5 Módulo de Comunicação LoRa

O módulo de rádio escolhido para a transferência de mensagens entre a estação e o *gateway* foi o RFM95W da HopeRF (Figura 4.5). O módulo é baseado no *chip* SX1276 da Semtech que opera na banda de frequências ISM europeia (868

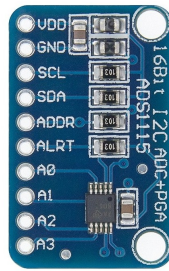


Figura 4.4: ADS1115 (em *board* de desenvolvimento) - Módulo de conversão analógico-digital [51]

MHz) [52]. A comunicação entre o módulo e o MCU é estabelecida a partir do protocolo de comunicação SPI. Contém seis pinos de *Input/Output* (I/O) de uso geral (denominados de DIO e numerados de 0 a 5) que têm associadas diversas interrupções do módulo. Destes, o *DIO0* é o mais utilizado por estar associado ao final da recepção/transmissão de uma trama. O módulo requer a inclusão de uma antena (no pino *ANT*) e a utilização do mesmo sem nenhuma pode danificá-lo. A alimentação do mesmo está limitada a 3,9 V, sendo que 3,3 V é o valor indicado pelo fabricante. Têm diferentes modos de operação que permitem economizar energia, dos quais se destaca: o estado adormecido, onde o consumo é praticamente residual ($1 \mu\text{A}$); de recepção de mensagens; e de transmissão. Permite ainda a configuração de parâmetros da camada física: o *Spreading Factor* (SF) que pode variar entre 7 e 12 e influencia a taxa de transmissão, o tempo de "viagem" (*time-on-air*) e a sensibilidade do recetor (Figura 4.6); a largura da banda (125, 250 e 500 MHz) que permite otimizar e relacionar a velocidade de transmissão com o alcance da comunicação; por fim, o *coding rate* que representa a proporção de *bits* transmitidos que contém informação e que influenciam o *time-on-air*.

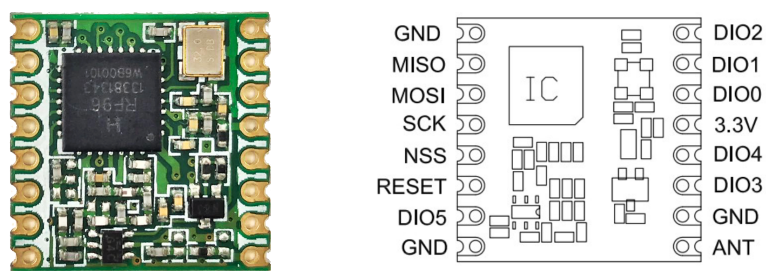


Figura 4.5: *Pin mapping* do módulo de rádio RFM95W [52]

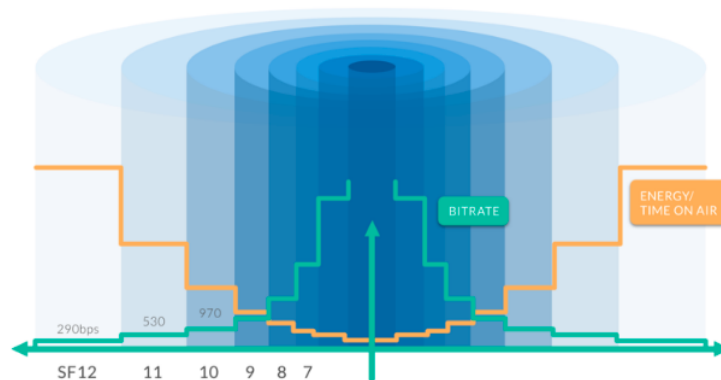


Figura 4.6: Relação entre o SF e o tempo de "viagem" no módulo de rádio LoRa [53]

4.1.6 Sistema de Gestão de Energia

Um dos requisitos do sistema é ser *stand-alone*, ou seja, ser auto-suficiente. O conceito que traduz a recolha, conversão e conservação da energia do meio, para posterior utilização em dispositivos eletrónicos de baixo consumo é denominado de *energy harvesting*. A implementação de um sistema destes implica a inclusão de diferentes módulos: de aquisição de energia; de gestão e carregamento; e de armazenamento.

No meio ambiente existem diferentes fontes energéticas acessíveis e que são frequentemente utilizadas em sistemas de monitorização do meio: a solar que, apesar de incontável é previsível e é das mais utilizadas; eólica que, através do movimento de aerogeradores, é a que consegue gerar energia mais rapidamente; termal que, com a variação da temperatura e através de transdutores termoelétricos consegue produzir energia [54] [55]. Tendo como base a previsão de energia gerada e a limitação do tamanho da infraestrutura foi incluído um painel solar como fonte energética do sistema. As dimensões do mesmo podem ser variáveis, dependendo da exposição solar do local de instalação, ou seja, quanto menor a exposição solar maior o painel.

Para dimensionar o painel e a capacidade da bateria é necessário prever o consumo horário do sistema. Neste sentido foi projetado o comportamento de um ciclo do mesmo (Figura 4.7), ciclo este que é configurável, isto é, o período entre estados pode ser alterado. A estação manter-se-á inativa a maior parte do tempo para estender a duração da bateria, ou seja, neste período adormecido os periféricos estão desativados, à exceção dos sensores eletroquímicos (que medem os compostos gasosos) e do microcontrolador. A necessidade de os sensores analógicos (CO, NO₂, O₃ e SO₂) estarem constantemente ativos prende-se com o facto de poderem demorar entre 4 a 30 horas a reportar medições estáveis depois de serem alimentados [56], já o MCU encontra-se num estado de *deep sleep* (consumo reduzido) e transita de estado a partir de um alarme gerado pelo RTC interno (com alimentação externa à do sistema que mantém o relógio a operar durante anos). Esta transição acontece

em duas ocasiões: para enviar uma mensagem de *keepalive* para o *gateway* (para prevenir/detetar erros na comunicação); ou para adquirir e reportar dados sensoriais. O estado de receção de configurações consiste na receção de mensagens LoRa enviadas pelo *gateway* e ocorre durante 15 segundos depois do envio de qualquer trama. O objetivo deste estado é habilitar a configuração de determinados parâmetros de forma externa, como é o caso da hora, periodicidade das mensagens, entre outros.



Figura 4.7: Comportamento horário do sistema de monitorização

O consumo horário depende do período em que cada um dos periféricos/módulos está ativo. Neste âmbito, foi construída a Tabela B.1 (presente no Anexo B) que relaciona o consumo (em mA) e o intervalo temporal (em segundos) que cada componente está ativo. A alimentação dos periféricos é gerida pelo microcontrolador através de dois pinos de *enable* para 3,3 V e 5 V. Estes *triggers* impedem que cada módulo seja alimentado de forma independente (Figura 4.8), isto implica despende energia mas, em contrapartida, reduzir a inclusão de *hardware*. Um caso concreto é no período de *keepalive*, uma vez que apenas o módulo de rádio LoRa deveria estar ativo (à exceção do MCU e dos sensores eletroquímicos) mas, como a alimentação do mesmo é de 3,3 V, o BME680 será igualmente alimentado.

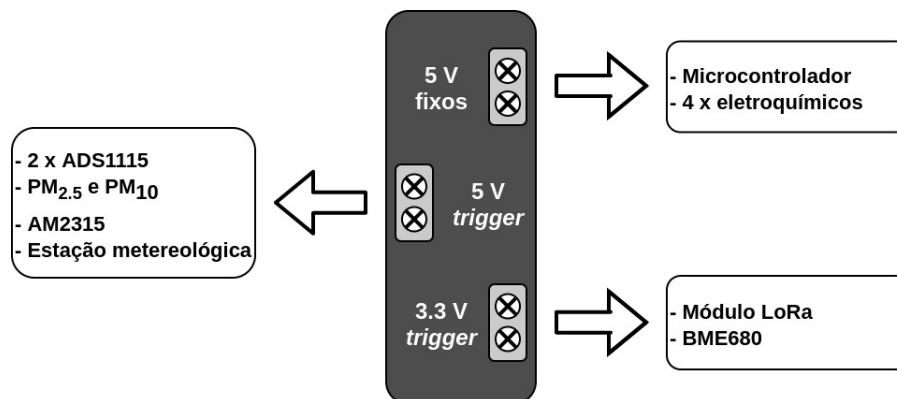


Figura 4.8: Esquema geral de alimentação dos diferentes módulos

Os períodos definidos na tabela B.1 correspondem a um ciclo de funcionamento original do sistema: 55 minutos num estado adormecido; 20 segundos para enviar uma mensagem de *keepalive* para o *gateway* (ocorre a cada 15 minutos perfazendo um total de 1 minuto); 1 minuto para receber uma eventual resposta do *gateway* (ocorre 4 vezes por ciclo e cada um dura 15 segundos); e por fim, 3 minutos para recolher dados de todos os sensores e reportá-los. A previsão do consumo total horário do sistema é de 67,3 mAh (somatório do consumo total de cada módulo).

Tendo em conta o consumo horário previsto do sistema é necessário prever a duração do mesmo sem receber energia, como é o caso do período invernal, onde podem existir dias consecutivos sem radiação solar suficiente para carregar as baterias. Considerando que as baterias recarregáveis utilizadas são de ião-lítio (Li-ion) e têm uma capacidade de 3350 mAh (modelo 18650, 3,7 V da LG) [57], foi elaborada a Tabela 4.1, relacionando a quantidade de pilhas (em paralelo) com a duração aproximada do sistema (tendo por base o consumo horário anteriormente apresentado). Face aos resultados obtidos e tendo em conta as dimensões, optou-se pelo conjunto de 4 baterias, com uma duração prevista de oito dias e sete horas sem carregamento. Foi também selecionada a fonte energética da estação: um painel policristalino (modelo CL-SM20P fabricado pela Cellevia Power) de 20 W, com uma tensão e corrente máxima de 18,2 V e 1,12 A, respetivamente.

Tabela 4.1: Comparação entre a duração expectável do sistema em função da capacidade da bateria

Quantidade	Capacidade (mAh)	Duração
1	3350	2 d, 2h
2	6700	4 d, 4h
4	13400	8 d, 7h
6	20100	12 d, 11h
8	26800	16 d, 14h

Com a definição do módulo de recolha de energia (painel solar), da bateria e dos módulos que estariam ativos/desativos nos diferentes períodos, foi necessário encontrar no mercado uma solução capaz de responder aos requisitos mencionados. A solução mais completa é desenvolvida pela DFRobot, o modelo DFR0535, que consiste num módulo de gestão de energia [58]. Esta *board* (Figura 4.9) permite o carregamento até 2 Amperes (A) de baterias de lítio (Li-ion e/ou polímero de lítio) a partir de um painel solar (com uma tensão de saída entre 7 e 30 V) ou de um carregador. Dispõe de uma saída fixa de 5 V e de 3 saídas reguláveis (o *trigger* pode ser dado pelo microcontrolador - *EN1*, *EN2* e *EN3* na Figura 4.9): 5 V - 1,5 A; 3,3 V - 1 A; e 9/12 V - 0,5 A, respetivamente. Estas saídas permitem desligar a alimentação dos sensores no período em que o sistema está adormecido, reduzindo assim a necessidade de inclusão de *hardware* para esse efeito. Contém um controlador de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) ajustável para diferentes painéis (9, 12

e 18 V). O objetivo do MPPT é manter a potência máxima dos painéis fotovoltaicos em qualquer condição ambiental, regulando as saídas (tensão ou corrente) para que o módulo de carregamento opere com a potência máxima [59]. A *board* contém uma saída USB e diversas proteções, tais como: polarização da bateria/painel solar, sobreaquecimento, corrente elevada e curto-circuitos.

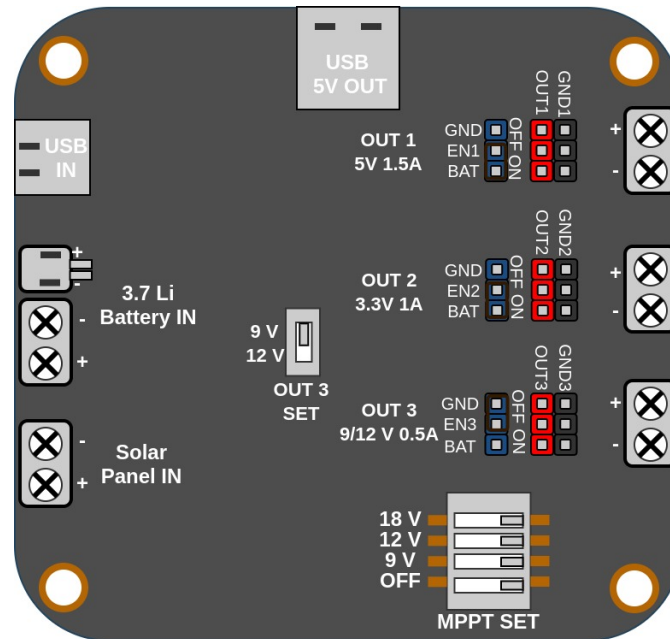


Figura 4.9: Sistema de gestão de energia do sistema - DFR0535

4.2 Arquitetura de *Hardware - Gateway*

A necessidade de implementação de um *gateway* (Figura 4.10) carece de um dispositivo cuja a implementação de qualquer tecnologia de comunicação seja acessível. Neste sentido, foi selecionado um microprocessador para controlar o sistema, uma vez que este não necessita de ter um baixo consumo energético por não ser *stand-alone*. Comparando-o com os microcontroladores (utilizado na estação), tem uma capacidade de processamento e armazenamento superior, por ter um *Central Processing Unit* (CPU) mais poderoso e por este ser separado da *Random Access Memory* (RAM) e da *Read Only Memory* (ROM). Com base nos pontos mencionados, foi selecionado o Raspberry Pi 4 Model B (de 4 GB de RAM). O fabricante, Raspberry Pi, tem uma vasta e ativa comunidade (o que facilita o processo de implementação) e os seus microprocessadores permitem a programação em múltiplas linguagens, das quais se destacam: *Java*, *JavaScript*, *C*, *C++* e *Python*. Os restantes módulos que compõem a simplificada arquitetura do *gateway* (em comparação com a arquitetura

da estação de monitorização mencionada na secção 4.1) são: uma fonte de alimentação *Universal Serial Bus Type-C* (USB-C) de 15,3 W e um módulo de rádio LoRa (igual ao apresentado na secção 4.1.5) para receção e envio dos dados com a estação. A ligação ao *broker* MQTT é estabelecida pelo módulo Wi-Fi que está integrado no microprocessador.

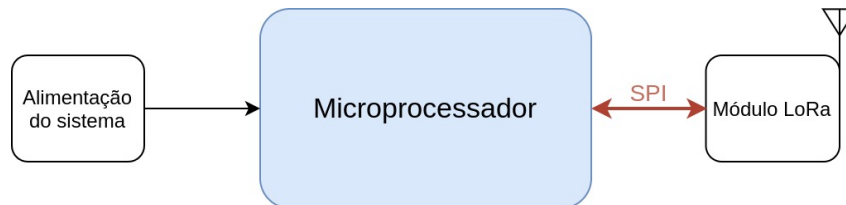
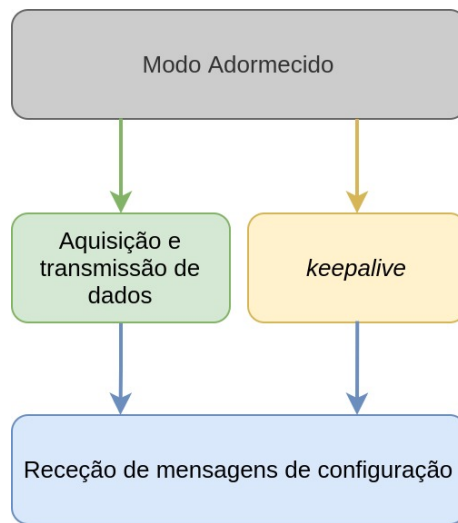


Figura 4.10: Arquitetura de *hardware* do *gateway*

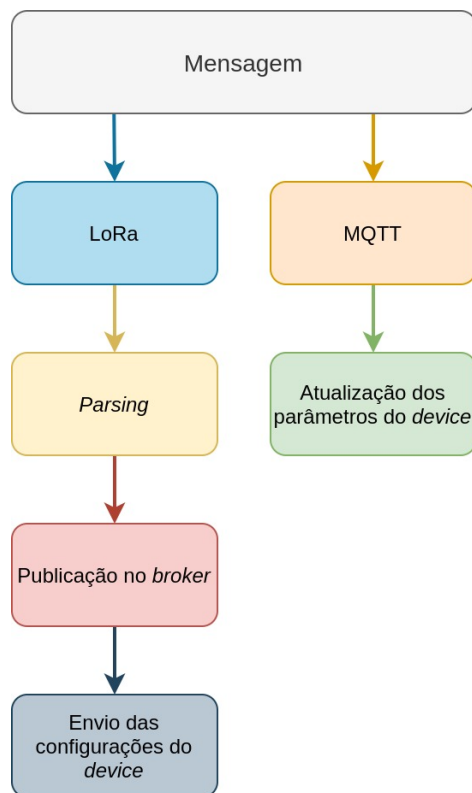
4.3 Arquitetura de Software - Estação

O sistema de aquisição de dados do meio deve, para garantir que os objetivos inicialmente definidos são alcançados, basear-se em três aspetos: garantir a durabilidade do sistema, ou seja, gerir de forma inteligente a energia utilizada, adquirir dados de todos os sensores e reportá-los e ser configurável, isto é, permitir que as propriedades que o constituem sejam alteradas. Neste sentido, foi desenvolvida a arquitetura geral de *software* da estação (Figura 4.12) que se centra em quatro estados: adormecido, aquisição e transmissão de dados, *keepalive*, e receção de mensagens. O primeiro, vulgarmente designado de *low power*, é o estado em que o sistema se encontra a maioria do tempo e no qual são desativados todos os periféricos à exceção dos sensores eletroquímicos (que medem os compostos gasosos) e do microcontrolador. O estado só é alterado depois do RTC gerar um alarme. Dependendo da hora atual, o sistema ou entra no estado de *keepalive* onde envia uma trama pelo módulo de rádio LoRa para o *gateway*, ou entra no estado de aquisição e transmissão de dados. Neste são ativos todos os periféricos para a recolha e envio da trama. Enviada a mensagem (de *keepalive* ou de dados), o dispositivo entrará no modo de receção para verificar se o *gateway* emitiu alguma resposta à trama por ele recebida. Caso se confirme, é feito o *parsing* à resposta do *gateway* e os parâmetros do sistema são atualizados. Com o processo terminado, o sistema volta ao modo adormecido, ou seja, apenas o microcontrolador e os sensores eletroquímicos são alimentados para maximizar a durabilidade do produto.

Figura 4.11: Arquitetura de *software* da estação

4.4 Arquitetura de *Software - Gateway*

O *gateway*, enquanto intermediário entre os *end nodes* (estações) e o *broker*, tem que gerir a receção/envio de diferentes mensagens de forma eficiente. A sua arquitetura, proposta na Figura 4.12, suprime as necessidades mencionadas. O dispositivo estará sempre recetivo a pedidos e o seu comportamento depende do tipo de recetor. Quando a trama é recebida pelo módulo de rádio LoRa, é feito o *parsing* à mensagem para que, caso cumpra a estrutura conhecida, seja publicada no *broker* MQTT. O *gateway* não necessita de conhecer previamente os dispositivos da qual receberá dados, uma vez que deve ser dinâmico, isto é, logo que a mensagem recebida respeite os parâmetros definidos, o *device* passará a ser conhecido para o *gateway* e para o *broker*. Quando os pedidos são feitos por parte do *broker* MQTT para um dispositivo conhecido, o *gateway* guarda a configuração do *device* (o ID do mesmo faz parte da mensagem) para enviar quando receber uma trama do dispositivo em questão, sendo que este ocorre a partir do módulo de rádio. A alteração de determinados parâmetros dos sistemas de monitorização só é possível porque os tópicos de publicação de configurações são subscritos aquando da receção da primeira mensagem LoRa.

Figura 4.12: Arquitetura de *software* do *gateway*

Capítulo 5

Implementação

Com base na arquitetura descrita no capítulo anterior, foi desenvolvido um sistema capaz de responder aos objetivos previamente definidos. A descrição detalhada dos diferentes constituintes da solução é apresentada nas secções seguintes.

5.1 Descrição do *Hardware* - Estação

A implementação de *hardware* da estação de monitorização, além de ter como base a integração dos diferentes módulos, sustentou-se no posicionamento destes para reduzir o comprimento da cablagem do sistema. Neste sentido, foram desenvolvidas duas *boards* para o sistema de monitorização. A primeira *Printed Circuit Board* (PCB) é considerada a base do produto, já que contém o microcontrolador e o *hardware* necessário para a comunicação com todos os periféricos. A segunda *board* é utilizada numa *box* de pequena dimensão (acoplado à caixa principal), uma vez que serve de ligação entre a placa principal e os sensores que devem estar em contacto direto com o ar para aumentar a fiabilidade dos dados adquiridos.

5.1.1 *Board* Principal

A placa principal do sistema foi desenhada para ser posicionada em forma de *stack* na *board* que faz a gestão energética do produto (descrita na secção 4.1.6), sendo que o esquemático completo desta encontra-se nas Figuras C.1 e C.2 do Anexo C. Foi incluído o microcontrolador STM32L476RGT6 e todo o *hardware* necessário

(mencionado pelo fabricante) ao seu correto funcionamento, incluindo os pinos de programação.

Na placa principal são vários os tipos de conectores existentes, tanto para alimentação como para comunicação com os diferentes periféricos. A alimentação contínua (5 V) é extraída da *board* de *power* através da saída USB da mesma e chega à placa principal através de um cabo micro-USB onde é distribuída para os diferentes periféricos (de acordo com a Figura 4.8). Para a restante alimentação (3,3 e 5 V), que só é ativa a partir de um *trigger* do MCU, é utilizado um conector molex de 4 pinos (modelo Mini-Fit com a referência 43045-0400). A maioria das saídas de alimentação e comunicação são estabelecidas a partir destes conectores, à exceção dos sensores de PM (presentes na *board* de interface) no qual é usado o conector de 6 pinos (modelo Mini-Fit com a referência 43045-0600). A designação atribuída a cada conector (presente no Anexo C) encontra-se descrita na Tabela seguinte.

Tabela 5.1: Designação dos diferentes conectores da PCB principal

Tipo de conector	Designação na <i>board</i>	Designação da ligação
micro-USB	J1	alimentação fixa de 5 V
<i>header</i>	J2	<i>trigger</i> de 5 V e bateria
	J3	<i>trigger</i> de 3,3 V e bateria
molex 43045-0400	J4	sensor de CO
	J5	sensor de NO2
	J6	sensor de O3
	J7	sensor de SO2
	J8	alimentação de 5 e 3,3 V
J9	estação meteorológica	
molex 43045-0600	J10	sensor de PM2.5 e PM10
molex 43045-0400	J11	comunicação I ² C e alimentação de 3,3 V

Como o microcontrolador deve operar com uma tensão de referência de 3,3 V, foi incluído um DC-DC do tipo *Low-Dropout (LDO) regulator*, o modelo AP2112K-3.3TRG1 (Figura 5.1), que converte a tensão de entrada de 5 V para a tensão mencionada. O IC dispõe de um pino de *enable* (cuja tensão varia entre 1,5 e 6 V) que está conectado ao VIN (pino 1) para que na saída esteja disponível o valor de referência e desta forma alimentar sempre o microcontrolador [60].

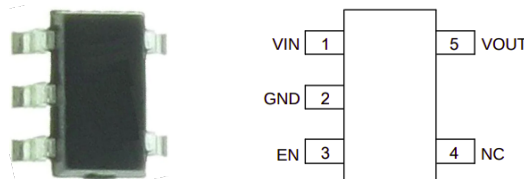
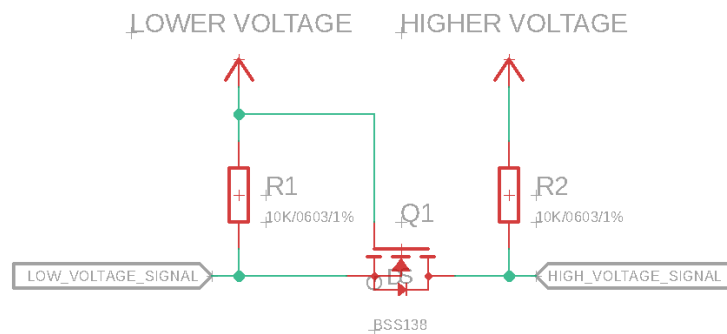
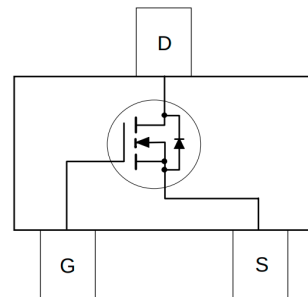


Figura 5.1: *Pin mapping* do regulador de tensão do microcontrolador [60]

A nível de comunicação, como o microcontrolador opera a uma tensão de referência (3,3 V) diferente de alguns sensores (o AM2315 que comunica através do protocolo I²C é alimentado a 5 V) foi necessário incluir *level shifters* bi-direcionais nas linhas de I²C para que estas não estivessem limitadas à tensão mencionada, sem perjúrio de danificar algum IC pelos pinos de comunicação. O modelo em causa (BSS138), exemplificado na Figura 5.2a, permite reduzir sinais superiores para inferiores (*higher voltage* e *lower voltage* respetivamente) e vice-versa. Neste caso concreto, ao pino de sinal superior é conectado o *output* do regulador de tensão (3,3 V) e ao inferior o *input* do mesmo IC (5V). A linha de "low voltage signal" corresponde, neste caso, à linha de comunicação do microcontrolador (ligada à *source* do *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) Q1, representado na Figura 5.2b) e a saída ("high voltage signal", *drain* do MOSFET Q1) é conectada à linha de comunicação do sensor.



(a) Exemplo de implementação



(b) Pinout da board [61]

Figura 5.2: BSS138 - *level shifter*

Como os sensores de *Particulate Matter* e a estação meteorológica operam à mesma tensão que o AM2315 (5 V), a estratégia anteriormente descrita poderia ser utilizada no protocolo UART. Ao invés disso, e como a UART é unidirecional, é incluído um divisor de tensão (Figura 5.3) de 5 para 3,3 V. A mesma estratégia é adotada para a leitura da bateria do sistema, uma vez que o ADC do microcontrolador está limitado à tensão de referência e o valor máximo que esta assume é de 4,2 V.

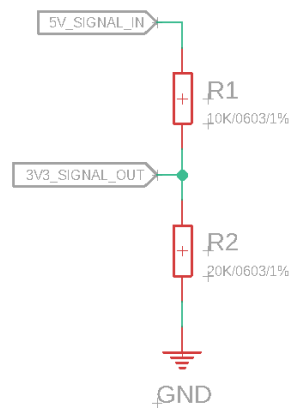


Figura 5.3: Divisor de tensão de 5 V para 3,3 V

Os restantes componentes presentes na *board* dizem respeito: às duas unidades de ADS1115 (utilizadas para as leituras dos sensores eletroquímicos), que estão representadas como ADC na Figura C.2 do Anexo C; o módulo de rádio LoRa, no qual foram incluídas dois tipos de conetores de antena (um simples fio condutor de cobre e um adaptador u.FL); pontos de testagem diversos; suporte para a bateria do RTC; e um botão para desligar a alimentação total do sistema. A PCB resultante (com base na descrição anteriormente apresentada) foi desenvolvida na plataforma Eagle da Autodesk e está representada nas Figuras 5.4 e 5.5

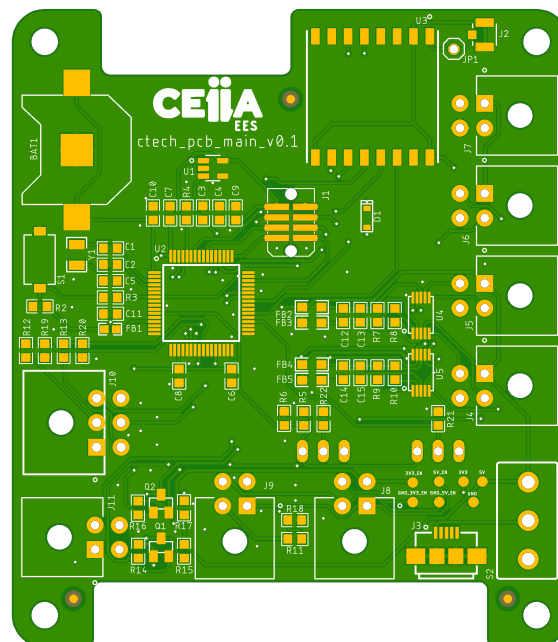


Figura 5.4: PCB principal da estação - lado superior

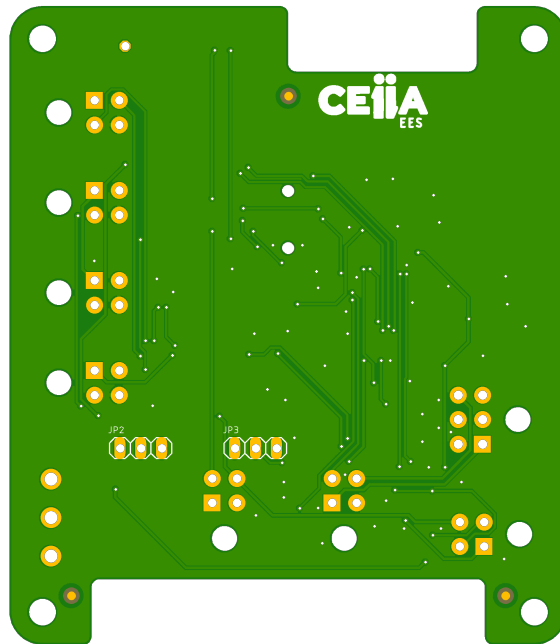
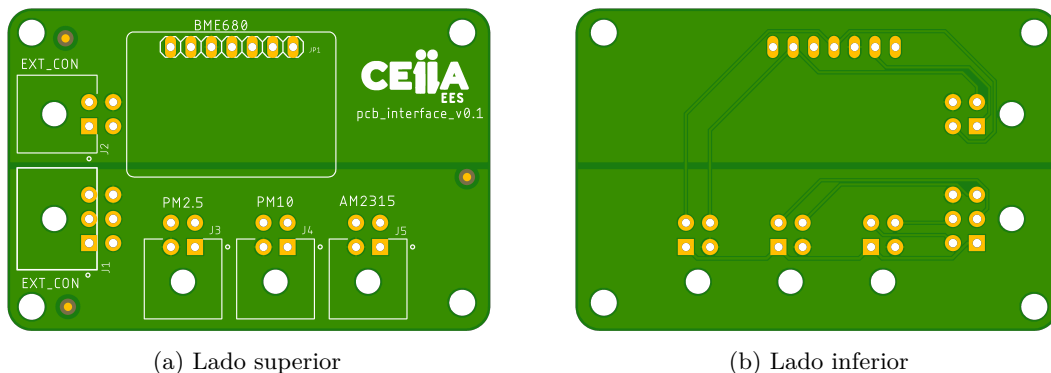


Figura 5.5: PCB principal da estação - lado inferior

5.1.2 Board de Interface

A placa de interface consiste numa *board* simples, representada na Figura C.3 no Anexo C, na qual são conectados os seguintes periféricos: AM2315, BME680 e os sensores de PM. À semelhança da principal, esta contém duas entradas de quatro e seis pinos com o mesmo tipo de conetores (J1 e J2 que correspondem a J10 e J11 na Tabela 5.1). Na saída são ligados os conetores dos sensores de PM e o AM2315, enquanto que o BME680 é inserido na própria *board*. A PCB descrita está representada nas Figura 5.6.



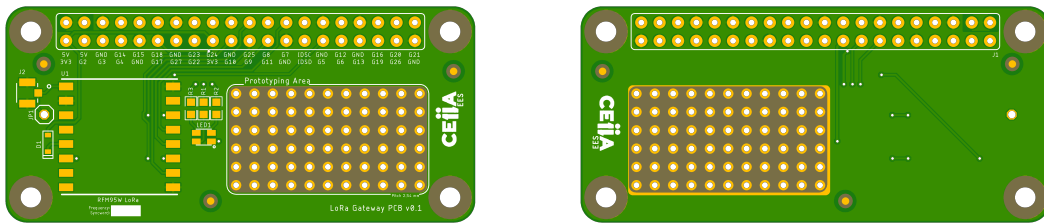
(a) Lado superior

(b) Lado inferior

Figura 5.6: PCB de interface da estação

5.2 Descrição de *Hardware - Gateway*

A implementação de *hardware* do *gateway* é simples pela reduzida quantidade de componentes do sistema. Para aumentar a robustez da estrutura foi desenvolvida uma PCB (Figura 5.7) de encaixe à *board* principal (Raspberry Pi 4) através dos *headers* do mesmo, a partir do qual é estabelecida a comunicação (SPI) entre o módulo de rádio LoRa e o microprocessador. À semelhança da *board* principal da estação de monitorização, foi incluída a possibilidade de uso de dois tipos de antenas. Foi inserido um led de estado e foi reservado um espaço para incluir protótipos (à direita na Figura 5.7a) para aumentar a versatilidade da *board* e assim não a limitar apenas ao módulo de rádio.



(a) Lado superior

(b) Lado inferior

Figura 5.7: PCB de interface do *gateway*

5.3 Construção dos protótipos

Na construção do protótipo da estação foi implementada a estratégia apresentada na sub-secção 5.1.1, que consiste na divisão do sistema em duas unidades. A placa principal é colocada em forma de *stack* na *board* (DFR0535) que gere o carregamento e distribuição de *power* para o sistema (Figura 5.8). A fixação entre as duas é estabelecida com a inclusão de espaçadores e de *headers* nos pinos de *enable* de alimentação (5 V e 3,3 V).

A *stack* encontra-se na caixa principal do sistema (Figura 5.9) com os restantes periféricos. Esta, além de albergar todas as ligações, contém o *pack* de 4 baterias (em paralelo), a *board* da estação meteorológica (que contém um BMP280 para monitorizar a temperatura e a humidade no interior da caixa) e os 4 sensores da Alphasense e respetivas *boards* (ISB). Do exterior existem 4 entradas para cablagem e uma saída: duas da *weather station*, uma para o painel solar, o cabo de *power* e de comunicação para a segunda *board* de interface com restantes sensores; e a antena LoRa para a comunicação com o *gateway*.

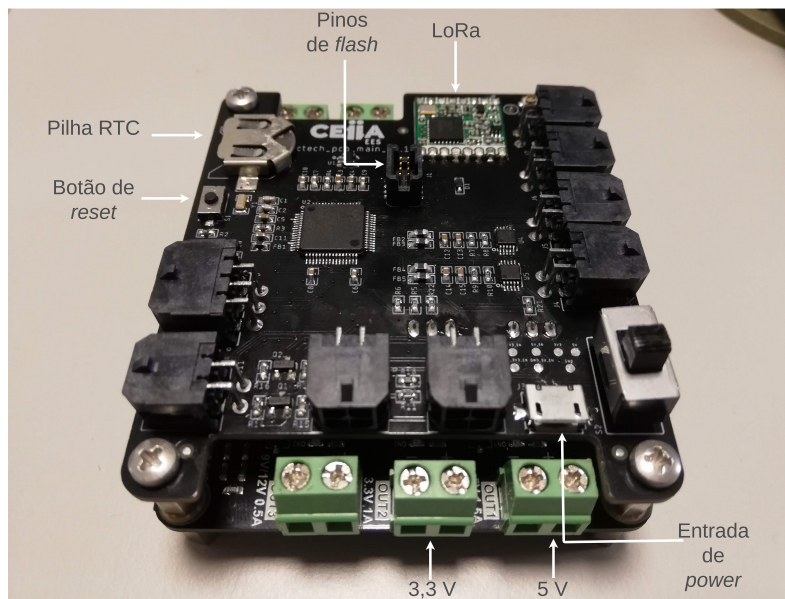


Figura 5.8: *Board* principal do sistema em *stack* com a placa de *power management*

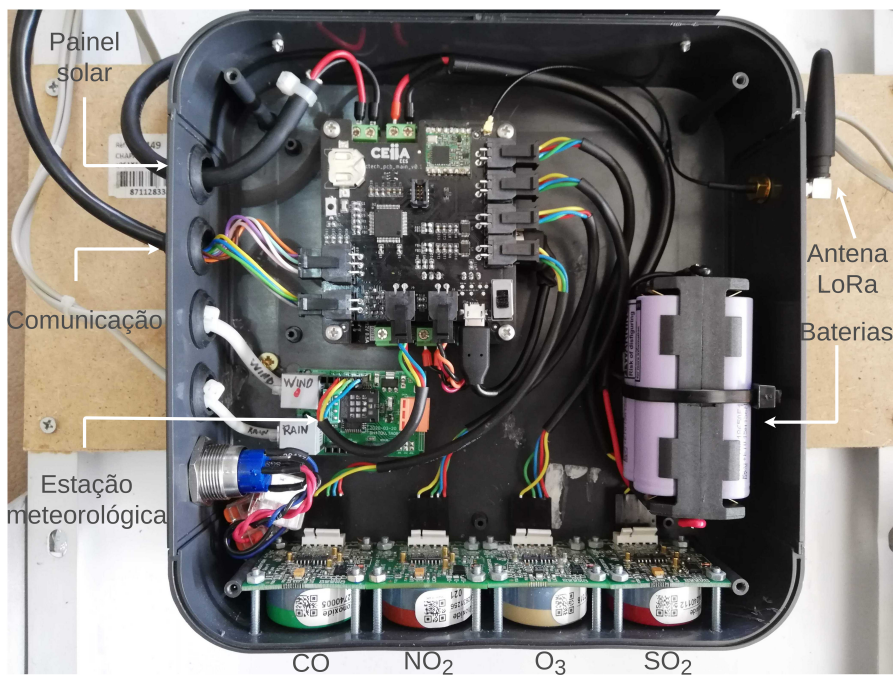


Figura 5.9: Protótipo da caixa principal do sistema de monitorização

A placa de interface com os restantes sensores é colocada na parte superior e é composta pelos sensores de PM, AM2315 e BME680 (Figura 5.10). A comunicação e a alimentação é estabelecida a partir de um cabo de 10 pinos: 2 para a linha I²C, dois para os 5 V, dois para os 3,3 V (os pinos de GND não podem ser comuns) e os

restantes para a comunicação UART dos sensores de PM.

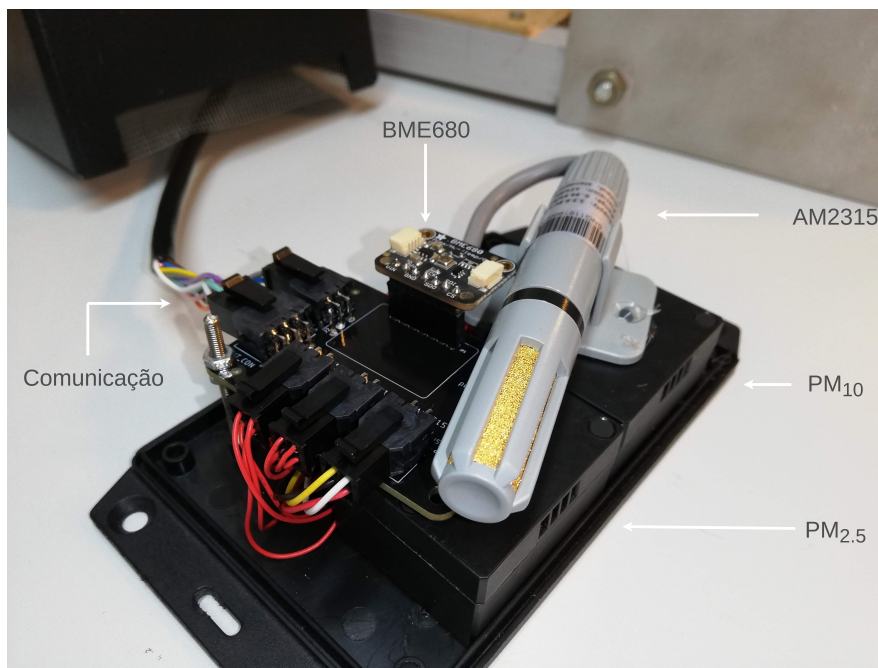


Figura 5.10: Protótipo da caixa secundária do sistema de monitorização

Na Figura 5.11 encontra-se a montagem final do protótipo desenvolvido. As duas caixas anteriormente apresentadas são agregadas ao painel solar e à estação de monitorização que contém os módulos de medição da velocidade e direção do vento, e de pluviosidade.

O *gateway*, presente na Figura 5.12, contém a *board* desenvolvida em forma de *stack* com o microprocessador da Raspberry Pi. Nesta é incluído o módulo LoRa e a respetiva antena para a comunicação.



Figura 5.11: Protótipo da estação de monitorização completa



Figura 5.12: Protótipo do gateway

5.4 Descrição de Software - Estação

Atualmente, a facilidade de implementação de soluções diversificadas resultam da evolução da tecnologia e da contribuição da comunidade em inovação. Neste sentido, o sistema foi construído sobre a *framework arduino* orientada a objetos, tendo

sido incluídos *drivers* fornecidos pelo fabricante do microcontrolador (STMicroelectronics), das *boards* de desenvolvimento com os sensores, sendo que todos foram alterados pelo autor com base nas necessidades de implementação, e construídos os restantes. Nas secções seguintes é apresentada a descrição detalhada de *software* dos diferentes módulos que constituem o sistema.

5.4.1 Aquisição sensorial

O funcionamento de toda a estrutura descrita até então é dependente do funcionamento e da qualidade dos dados adquiridos dos diferentes sensores que constituem o sistema de monitorização. Como os protocolos de comunicação são díspares, foi necessário desenvolver meios para receber dados e executar pedidos que são descritos nas sub-secções seguintes.

BME680 e AM2315

A aquisição sensorial dos parâmetros ambientais (temperatura, humidade, pressão atmosférica e VOCs) é obtida a partir dos sensores BME680 e AM2315. Como os sensores são do mesmo fabricante (Adafruit) foi incluído e ajustado o *driver* destes para estabelecer comunicação entre o microcontrolador e os dispositivos através do protocolo I²C. Apesar de medirem parâmetros comuns (temperatura e humidade), o AM2315 tem uma precisão superior e desta forma os dados medidos pelo BME são descartados (apenas é tido em consideração a pressão atmosférica e os VOCs).

A biblioteca do BME680 contém métodos de inicialização dos diferentes parâmetros e a aquisição de dados ocorre depois do *forced mode* ser executado. Este modo de operação não é bloqueante, isto é, o microcontrolador não aguarda pela resposta no mesmo ciclo, uma vez que quando esta está "pronta", um dos métodos retorna *true* e é feito o *parsing* da trama recebida.

A comunicação com o AM2315 é simples, uma vez que consiste no envio de uma trama que traduz um pedido de dados, sendo que a resposta só é considerada se tiver elementos conhecidos e se o *Cyclic Redundancy Check* (CRC) for válido (é comum ser utilizado para detetar erros na troca de mensagens). A mensagem convertida (com os dados de temperatura e humidade) é devolvida a partir do método.

Sensores Eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos capazes de reportar a concentração de poluentes são extremamente sensíveis e exigem algum processamento adequado. O fabricante dispõe de *application notes* na qual providencia algoritmos para corrigir de forma primária os resultados medidos, defendendo que deve ser realizada uma correção secundária (deslocamentos residuais e alterações de ganho) a partir de um analisador de referência. Um dos processos primários é usar a temperatura ambiente para corrigir o

output [62]. Neste processo, são recomendados quatro equações (5.1, 5.2, 5.3 e 5.4) que dependem de um fator de compensação de temperatura (representado como n_T , k_T , k'_T e k''_T nas diferentes fórmulas), dos valores lidos através da conversão analógico-digital nos pinos OP1+ e OP2+ da ISB (WE_u e AE_u , respetivamente), e dos parâmetros de fábrica (mencionados na secção 4.1.3): WE_e e AE_e como *offset* de tensão, e WE_0 e AE_0 como valores de referência (*zero voltage*) no vazio dos canais OP1+ e OP2+, respetivamente. O valor resultante das diferentes equações (considerado como correto) é designado por WE_c e é a partir deste que é calculada a concentração do gás. A cada sensor é atribuída uma equação considerada pelo fabricante como a mais indicada, estando representadas na Tabela E.1 do Anexo E.

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T * (AE_u - AE_e) \quad (5.1)$$

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - k_T * \frac{WE_0}{AE_0} * (AE_u - AE_e) \quad (5.2)$$

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - (WE_0 - AE_0) - k'_T * (AE_u - AE_e) \quad (5.3)$$

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - WE_0 - k''_T \quad (5.4)$$

Nas equações anteriormente mencionadas é necessário o fator de compensação de temperatura. Este fator tem por base a temperatura atual e os fatores descritos pelo fabricante (entre -30 °C e 50 °C) que estão presentes na Tabela E.2 do Anexo E. Como o intervalo de temperaturas entre fatores é desfasado 10 °C e como os diferentes fatores de temperatura não são lineares, é necessário traçar uma equação da reta entre o intervalo da temperatura atual para assim determinar o fator mais aproximado.

O cálculo da concentração final (WE_c) é convertido para *Parts per Million* (ppm) através da equação seguinte.

$$\text{concentração (ppm)} = \frac{WE_c}{\text{sensibilidade}} \quad (5.5)$$

Como o sistema de unidades da concentração de compostos gasosos utilizado na União Europeia é em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, é necessário converter o valor de ppm. Neste sentido, é necessário a massa molar do composto gasoso para converter na unidade de medida pretendida:

$$\text{concentração } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 40,9 * \text{concentração(ppm)} * \text{massa molar} \quad (5.6)$$

Para colmatar as necessidades anteriormente descritas foi criado um *driver* para aquisição de dados de qualquer sensor do mesmo fabricante. Este tem como dependência o *driver* amplamente utilizado na comunidade e desenvolvido pelo fabricante das placas de desenvolvimento do conversor de analógico para digital (ADS1115), mencionado na secção 4.1.4, a Adafruit. Na inicialização do objeto são definidos todos os parâmetros de fábrica, o endereço I²C do ADC, os pinos do ADS1115 na qual estão ligados os canais OP1+ e OP2+ da ISB, a equação de correção dos dados, o tipo do poluente e o *Serial Number* (SN) do sensor. Esta classe está dividida em três métodos:

- inicialização - que dependendo do poluente e da equação de correção, guarda um *array* com os fatores de temperatura (presentes na Tabela E.2 do Anexo E) e a massa molar do poluente, e inicializa a comunicação com o ADC a partir do endereço I²C definido. Caso surjam erros na inicialização dos periféricos, o método apresenta-os (através da porta série de *debug*), sendo eles: a identificação de um poluente para a qual não existem dados dos fatores de temperatura atribuídos, falha na comunicação com o ADS1115 para o endereço em causa, e a definição de uma equação de correção que não existe;
- cálculo do fator de compensação da temperatura - o método, que recebe como parâmetro a temperatura atual (medida pelo AM2315 que se encontra no exterior), percorre um *array* de temperaturas para determinar o intervalo em que a atual se encontra e, a partir desta informação e dos fatores de compensação respeitantes, determina a equação da reta. Desta equação é retornado o fator de compensação aproximado à temperatura atual;
- cálculo da concentração - retorna a atual concentração (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) do poluente em causa, a partir da equação escolhida, na qual são inseridos os valores *raw* da média de cinco leituras por canal (OP1+ e OP2+), os parâmetros de fábrica e o fator de compensação calculado no método anteriormente descrito.

Material Particulado

Os sensores da Honeywell que medem a concentração do material particulado de 2,5 e 10 μm , comunicam através da UART com um protocolo específico definido pelo fabricante (Tabela 5.2). Neste sentido, foi desenvolvido um *driver* de comunicação com o sensor a partir de uma porta série do microcontrolador para alterar o seu modo de funcionamento e adquirir e converter as concentrações medidas. Os métodos da classe criada seguem o mesmo padrão da coluna "Modo" da Tabela 5.2. Em todos os pedidos feitos ao sensor é, caso haja comunicação, recebida uma resposta (em hexadecimal) que assume sempre dois valores: negativa quando o sensor não

consegue executar o pedido efetuado; positiva quando o pedido é realizado. Dependendo do pedido, a resposta positiva pode conter mais informação, como é o caso da aquisição de dados e do pedido de obtenção do coeficiente de ajuste.

Tabela 5.2: Protocolo de mensagens com o sensor de PM (Honeywell)

Modo	Trama enviada	Mensagem						
		Positiva					Negativa	
		head	len	cmd	data			
Aquisição de dados	68 01 04 93	40	05	04	DF1 DF2 DF3 DF4 CS	9696		
Iniciar medição	68 01 01 96	A5A5						
Parar medição	68 01 02 95							
Definir coeficiente de ajuste	68 02 08 64 DF1 DF1: 30~200	DF1 CS						
Adquirir coeficiente de ajuste atual	68 01 10 87							
Parar <i>autosend</i>	68 01 20 77	A5A5						
Iniciar <i>autosend</i>	68 01 40 57							

Para obter dados do sensor é necessário enviar a trama para habilitar o modo de *autosend* e, sempre que for necessário recolher dados, enviar a mensagem de aquisição. O resultado deste envio tem que ser validado, através de um *checksum* (CS no campo *data* da Tabela 5.2), para calcular as devidas concentrações. A trama só é válida se o *checksum* recebido na mensagem for igual ao calculado na Equação 5.7.

$$CS = \text{mod}((65536 - \text{head} - \text{len} - \text{cmd} - DF1 - DF2 - DF3 - DF4)/256) \quad (5.7)$$

Depois de validada a trama, esta é convertida na concentração (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) dos diferentes tamanhos do material particulado (2,5 e 10 μm) através das equações seguintes (5.8 e 5.9).

$$PM_{2.5} = 256 * DF1 + DF2 \quad (5.8)$$

$$PM_{10} = 256 * DF3 + DF4 \quad (5.9)$$

Estação Meteorológica

A estação meteorológica presente no sistema comunica o conjunto de dados adquiridos, através da *board* do fabricante e da UART conectada ao microcontrolador. Ao contrário do sensor apresentado na secção anterior, esta não responde a pedidos de dados, apenas os reporta a uma frequência de 1 Hz. Como a periodicidade é uma condicionante na construção de todo o processo de aquisição dos restantes dados que compõe a estação de monitorização, optou-se por incluir o método *serialEvent* da

porta em causa, uma vez que este é executado sempre que uma nova trama é recebida. A partir daqui, a trama é enviada para um *buffer* de dados através da execução de um novo método da classe criada para esse propósito. O *parsing* da mensagem recebida (Figura 5.13) é realizado de forma individual porque os diferentes parâmetros (apresentados na Tabela 5.3) não se encontram no Sistema Internacional (SI) de unidades.

c000s000g000t082r000p000h48b10022*3C

Figura 5.13: Mensagem enviada pela estação meteorológica

Tabela 5.3: Caracterização da mensagem enviada pela estação meteorológica (SEN0186)

Mensagem	Parâmetro	Unidade
c000	direção do vento	graus (°)
s000	velocidade média do vento no último minuto	milhas por hora (Mph)
g000	velocidade máxima nos últimos cinco minutos	milhas por hora (Mph)
t082	temperatura	Fahrenheit (°F)
r000	pluviosidade na última hora	polegadas (in)
p000	pluviosidade nas últimas vinte e quatro horas	polegadas (in)
h48	humidade	percentagem (%)
b10022	pressão atmosférica	hectopascal (hpa)

5.4.2 Protocolo de Mensagens LoRa

A construção de um protocolo de mensagens através do módulo de rádio é complexa pela extensa quantidade de registos (parâmetros) que é necessário configurar. Neste sentido, optou-se por incluir um *driver* amplamente utilizado na comunidade com o mesmo propósito.

Depois de criar o objeto da classe de comunicação (LoRa), são definidos, a partir do método de inicialização, os pinos de interface (*chip select*, *reset* e o de interrupção, este relacionado com o fim dos processos de transmissão e receção); da comunicação SPI (MOSI, MISO e SCK) e os parâmetros da camada física: a frequência (que pode variar de 863 a 870 MHz em Portugal), a *bandwidth* e o SF. O módulo contém um *First In First Out* (FIFO) que consiste numa unidade de memória RAM (um *buffer* de dados de 256 *bytes*) que permite aceder aos dados recebidos e inserir os dados a enviar. Este *buffer* só pode ser acedido quando o módulo de rádio não está num

estado adormecido (mencionado na secção 4.1.5) e é limpo sempre que o dispositivo é colocado neste modo de operação (*sleep*).

O processo de transmissão de mensagens (descrito na Figura 5.14a) só é iniciado se não houver outro processo (de transmissão ou receção) a ser executado. A primeira etapa consiste na limpeza do *buffer de dados* para atualizá-lo com a nova trama e na definição do tamanho desta no registo reservado para esse propósito (*LoRa payload length*). O módulo é colocado em modo de transmissão e é iniciado o processo de envio da trama que se encontra no FIFO. O processo termina quando a interrupção *TXDone* (associada ao pino *DIO0* do IC) é executada. Terminado o processo, é feito um *reset* às *flags* relacionadas com a interrupção e o módulo é colocado em modo *sleep*.

O processo de receção de mensagens pelo módulo de rádio LoRa (presente na Figura 5.14b) é iniciado da mesma forma que o de transmissão, isto é, pela limpeza do FIFO. É definido o modo de operação como *RX single* ao invés do *RX continuous*, uma vez que é indicado pelo fabricante para dispositivos operados a bateria e com restrições de consumo. O módulo aguarda a receção de uma trama durante um período definido, sendo que a receção desta é indicada pela execução da interrupção associada (comum à transmissão). O primeiro parâmetro obtido é o tamanho do *buffer* de dados (indicado no registo *LoRa payload length*) e é retornado cada caractere individualmente até toda a trama estar percorrida. Quando o valor de *timeout* é atingido, são limpas as *flags* associadas e o módulo retorna ao modo *sleep*.

5.4.3 Máquina de Estados Finita

Para facilitar o processo de implementação de um sistema que depende de diferentes recursos em diferentes situações, é elaborada uma máquina de estados finita representativa das necessidades do produto (Figura 5.15). O desenvolvimento deste tipo de arquiteturas é amplamente utilizado há décadas, depois de ter sido criado por David Harel, e consiste num conjunto finito de estados do sistema, no qual apenas um pode estar em execução, compostos por ações (de entrada, saída e de estado) e transições (condições que provoquem a alteração de estado) [63]. As tabelas que contêm a informação detalhada da máquina de estados descrita na Figura 5.15 encontram-se no Anexo D.

Power Off

O estado de "power off" é considerado um estado diferente dos restantes, isto porque consiste num estado físico na qual a maioria dos periféricos se encontra desligado. A exceção são os sensores da Alphasense e o MCU que se encontra num estado de consumo mínimo. A transição deste só acontece para o estado seguinte ("check memory"), a partir de um *trigger* gerado por um alarme do RTC interno.

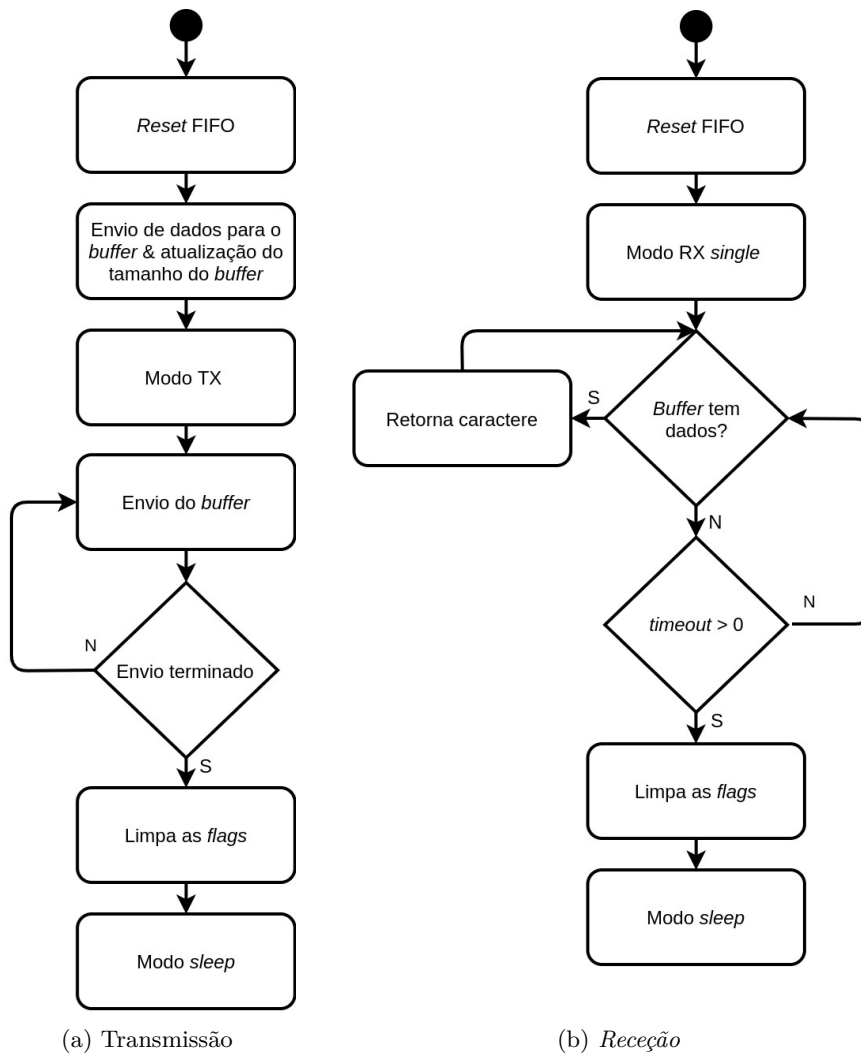


Figura 5.14: Processo de transmissão e receção da dados a partir do módulo de rádio LoRa

Check Memory

O estado inicial do sistema depois deste ser acordado é denominado de "check memory", consiste no estado que instancia todos os periféricos, adquire os dados armazenados na *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memories* (EEPROM) do microcontrolador e, tendo por base a hora atual e a duração de cada estado, calcula a hora de início do estado seguinte. Estes parâmetros que são guardados nos registos da EEPROM correspondem aos períodos de aquisição e envio de dados e de mensagens de *keepalive*, e dos parâmetros da camada física do módulo LoRa. Todos podem ser alterados, o que garante que não se perdem depois de o microcontrolador ser desligado. Só podem assumir o valor máximo do tamanho de uma variável *uint8_t*, isto é, um byte, ou seja, 255 em decimal.

Como toda a estrutura do dispositivo está construída sobre periodicidades, é

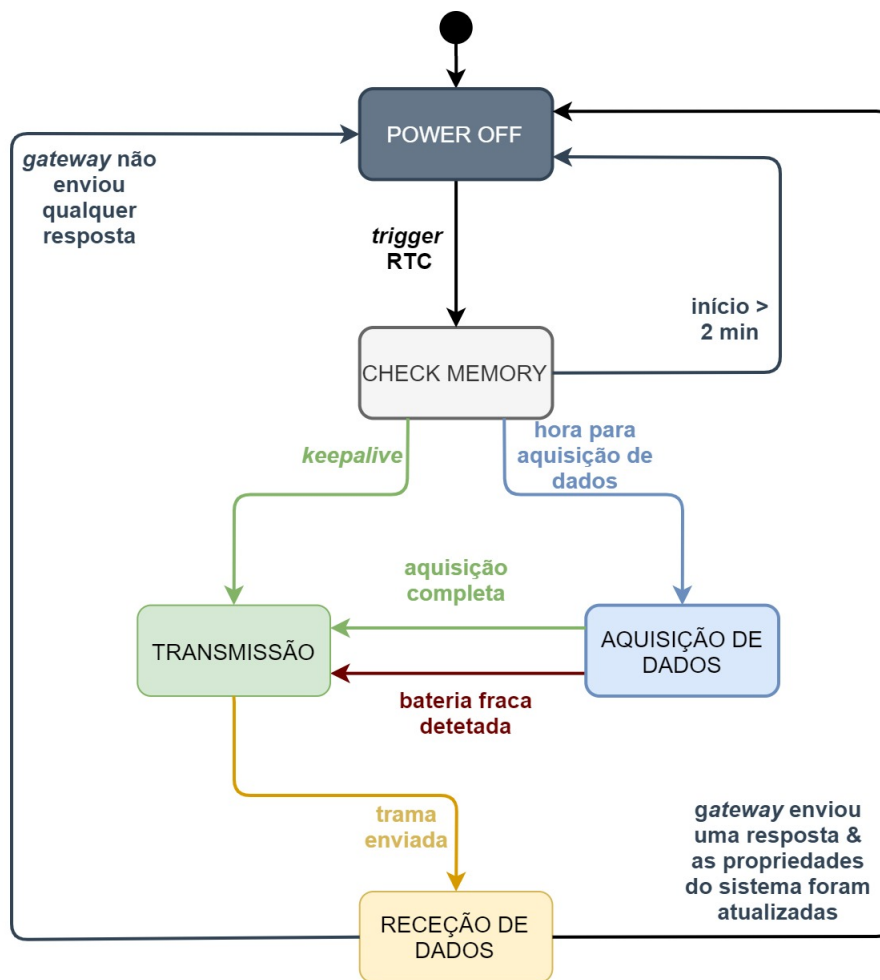


Figura 5.15: Máquina de estados - Estação

necessário configurar o RTC presente para o correto funcionamento do sistema. Neste sentido, para definir e aceder à hora atual do RTC, estabelecer alarmes e formatos horários, foi incluída uma versão do autor do *driver* da STMicroelectronics. Desta está dependente o *driver* que permite alterar o modo de funcionamento do *device* ("LowPower" do mesmo fabricante e com uma versão do autor), uma vez que para este ficar em modo adormecido ou desligado é necessário definir um alarme no RTC com a hora para o acordar. Para garantir que o RTC continua a operar depois da alimentação do dispositivo ser desligada ou depois deste entrar num estado de *low power*, é inevitável a inclusão de uma bateria própria (de 3,3 V) e da definição da fonte do relógio como *Low Speed External (LSE)* [64]. Foi desenvolvido um método que calcula e retorna a hora de início do estado seguinte e que, no caso das transições ocorrerem à mesma hora, dá prioridade à que transita para o estado de "aquisição de dados" ao invés da que transita para o estado de "transmissão" (para enviar uma mensagem de *keepalive*).

Antes da transição é necessário habilitar a alimentação dos periféricos que estarão ativos no estado seguinte e instanciá-los. Neste sentido, foi criada uma estrutura de dados denominada de *device* (Listagem 5.1), que é inicializada no construtor da máquina de estados e que contém os parâmetros comuns a qualquer dispositivo: o estado do dispositivo/sensor (*status*), o estado do último pedido de mensagem (*data*) que é verdadeiro quando um dado é retornado e falso quando não; por fim, um contador (*counter*) que é incrementado sempre que um novo dado do periférico é adquirido, sendo este parâmetro utilizado no cálculo da média. É criado um objeto desta estrutura para cada um dos sensores para evitar que, caso haja um erro na inicialização, se adquira dados, uma vez que o parâmetro de *status* permanecerá a falso.

```
1      struct device
2      {
3          bool status;
4          bool data;
5          uint16_t counter;
6      };
```

Listagem 5.1: Estrutura de parâmetros
comuns a todos os sensores

Aquisição de Dados

Uma das transições do estado inicial é para o estado onde são adquiridos e tratados os dados recolhidos (representado a azul na Figura 5.15). Esta recolha acontece durante um período estabelecido, alterável e armazenado na EEPROM. Como os sensores, pelos diferentes protocolos de comunicação que os compõe, têm diferentes tempos de resposta, foi necessário gerir a quantidade de dados recolhida para evitar discrepância na quantidade de amostras de cada um. Neste sentido, foi considerado uma aquisição de dados a uma frequência de 1 Hz. Sempre que um dado é adquirido, a variável booleana "*data*" do objeto da estrutura do sensor é alterado para verdadeiro (e para falso sempre que um novo ciclo é iniciado) e o contador ("*counter*") incrementado. Para organizar o conjunto de médias dos diversos dados foi criada uma estrutura que se encontra na Listagem 5.2. À semelhança da estrutura anterior, esta também é inicializada no construtor da classe.

```

1      struct
2      {
3          float soc;
4          float int_temperature;
5          float int_humidity;
6          float CO;
7          float NO2;
8          float O3;
9          float SO2;
10         uint16_t pm_2_5;
11         uint16_t pm_10;
12         float ext_temperature;
13         float ext_humidity;
14         float atmospheric_pressure;
15         float voc;
16         float wind_direction;
17         float wind_speed;
18         float rainfall;
19     } m_data;

```

Listagem 5.2: Estrutura de dados do sistema

A estrutura de dados que deve ser enviada para o *gateway* deve conter a média das amostras recolhidas em determinado período de tempo. Para armazenar um conjunto elevado de dados de cada sensor era necessário criar um *array* para cada um deles, sendo este processo dispendioso a nível de memória. Neste sentido, para minimizar o impacto deste cálculo optou-se por calcular a média de cada parâmetro de forma recorrente, isto é, cada cálculo é feito com base no anterior de forma iterativa (Equação 5.10). Desta forma, são necessárias três variáveis para o cálculo da nova média (\bar{x}_n): o número atual de amostras (n), a média atual (\bar{x}_{n-1}), e o último valor medido (x_n).

$$\bar{x}_n = \frac{(n-1) \cdot \bar{x}_{n-1} + x_n}{n} \quad (5.10)$$

Um dos parâmetros presentes na Listagem 5.2 e não mencionado até então é o estado da bateria intitulado de *State of Charge* (SoC). O cálculo deste divide-se em duas etapas: a tensão da bateria, e a sua conversão num valor percentual. O primeiro é obtido a partir do ADC do microcontrolador (Equação 5.11) que, por ser de 12 bits, tem que ser dividido por 4095, e multiplicado por 5 (fator de escala) face à inclusão do divisor de tensão (apresentado na Figura 5.4), uma vez que o valor máximo do ADC do STM32 é de 3,3 V. O cálculo do valor (Equação 5.12) percentual é aproximado, sendo considerados os valores máximos (V_{max}) e mínimos

da bateria (V_{min}), 3,0 V e 4,19 V, respetivamente.

$$V_{bat} = 5 * \frac{V_{ADC}}{4095} \quad (5.11)$$

$$SOC = \frac{V_{bat} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} * 100 \quad (5.12)$$

Se a tensão da bateria do sistema for superior ao V_{min} quando o ciclo de aquisição terminar, será executada a transição para o estado de "transmissão" para enviar os dados recolhidos. Se a partir de três medições, ou seja, três segundos no estado de "aquisição de dados", o valor da bateria for inferior a 3 V, o sistema entra no estado de transmissão para indicar ao *gateway* que a sua carga é extremamente reduzida e de seguida desliga-se para evitar danos na bateria. Quando o contrário acontece, isto é, quando a bateria do sistema está num nível superior a 3 V, a transição para reportar os dados medidos só ocorre no final do período de recolha. No final do estado é desligada a alimentação dos periféricos para reduzir o consumo energético, e o sistema passa para o estado de "transmissão" para enviar os dados recolhidos.

Transmissão

No estado de "transmissão" a informação anteriormente recolhida é enviada para o *gateway* através do módulo de rádio LoRa. Para organizar a trama a enviar é necessário identificar a transição que originou a execução do estado em questão, uma vez que a mensagem difere em tamanho e conteúdo. O início de cada trama é comum a todas as enviadas, no qual é indicado o SN do dispositivo (NS - para ser identificado pelo *gateway*) e o *epoch time* do mesmo (contador representado em segundos desde o dia 1 de janeiro de 1970), sempre separados por um ponto e vírgula. O terceiro campo é o que identifica o tipo de mensagem e que permite ao *gateway* validar que a trama recebida corresponde a um sistema de monitorização: *keepalive*, *low_battery* e *data*. Quando a transição não corresponde à "aquisição completa", (presente na Figura 5.15), é enviada uma mensagem com apenas cinco campos (Figura 5.16), no qual os dois últimos correspondem à versão de *hardware* e de *firmware* do sistema.

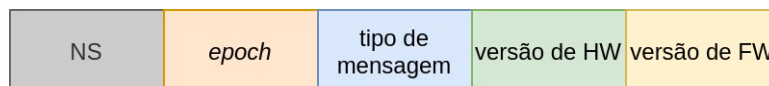


Figura 5.16: Mensagem (de *keepalive* ou bateria baixa) enviada pelo módulo

Quando a transição é relativa à "aquisição completa", é construída a trama de dados (Figura 5.17) com a mesma ordem da estrutura mencionada na Listagem 5.2. Se por algum motivo algum dos sensores não reportar qualquer dado no período

de aquisição, o contador associado ao periférico permanecerá a zero e desta forma o campo da mensagem do dispositivo em questão terá o valor de "error". Com a trama de mensagens construída e enviada é executada a transição para o estado de "recepção de dados"

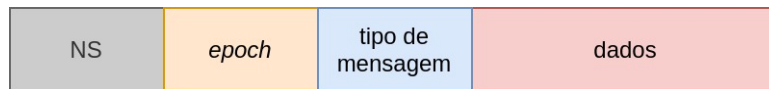


Figura 5.17: Trama de dados enviada pelo módulo

Recepção de Dados

O estado de "recepção de dados" permite configurar determinados parâmetros de funcionamento do sistema. Para tal, é necessário colocar o módulo de rádio LoRa em modo de recepção. Neste sentido, se durante o período definido (originalmente de quinze segundos) for recebida alguma mensagem é feito o *parsing* e, caso a mensagem corresponda a uma das presentes na Tabela 5.4 é atualizado o parâmetro no endereço de memória da EEPROM ou, no caso de ser um pedido de atualização da hora do sistema esta é atualizada a partir do *epoch time* recebido. O parâmetro a configurar é enviado (pelo *gateway*) em número em vez de *string* para reduzir o processamento de comparação de *strings* e sobretudo para diminuir o tamanho do *buffer* de dados (FIFO). A Figura 5.18 exemplifica uma possível mensagem enviada pelo *gateway*, na qual são alterados três parâmetros: a hora do sistema, a periodicidade das mensagens de *keepalive*, e a duração da aquisição de dados. O parâmetro é separado do valor com dois pontos e a divisão entre parâmetros é feita recorrendo ao ponto e vírgula.

Quando o período de aquisição termina, é calculada a hora de início do próximo ciclo, é definido o próximo alarme do RTC, é desligada a alimentação de todos os periféricos e o microcontrolador fica em modo desligado.

Tabela 5.4: Parâmetros configuráveis do sistema recebidos pelo módulo de rádio LoRa e armazenados na EEPROM

Parâmetro	Atributo na trama	Endereço na EEPROM
Atualizar a hora do sistema	0	-
Periodicidade de mensagens de <i>keepalive</i>	1	0
Periodicidade de dados	2	1
Duração da aquisição de dados	3	2
<i>Spreading Factor</i>	4	3
<i>Bandwidth</i>	5	4

0:1633190013;1:10;3:1;

Figura 5.18: Exemplo de trama enviada pelo gateway

5.5 Descrição de *Software - Gateway*

A implementação de um dispositivo que gere mensagens de diferentes fontes baseou-se, à semelhança da estação de monitorização, em *drivers* amplamente utilizados na comunidade para propósitos idênticos. Neste sentido, toda a estrutura foi construída na linguagem de programação *Python* sendo que, para facilitar a comunicação entre os dois módulos (rádio LoRa e *broker*), foi incluída uma biblioteca da Adafruit para a troca de mensagens com as estações de monitorização e uma da Eclipse (*paho*) para a comunicação MQTT.

A arquitetura implementada não depende do número de estações de monitorização nem de *gateways*, uma vez que está preparada para estabelecer comunicação com qualquer dispositivo que respeite a estrutura de mensagens definida. A descrição da integração dos diferentes constituintes do sistema é detalhado nas secções seguintes.

5.5.1 Configuração da Comunicação

Quando o *gateway* é inicializado, há um conjunto de configurações iniciais relacionadas com os diferentes protocolos que são executadas. A comunicação com o módulo de rádio é estabelecida depois da construção do objeto, na qual são indicados os pinos de comunicação e os parâmetros da camada física (frequência, SF e *bandwidth*) que têm que ser iguais aos das estações. A receção de mensagens, que está diretamente associada ao pino *DIO0* do módulo (mencionado na Secção 4.1.5), acontece a partir da execução de uma função de interrupção.

O *gateway*, enquanto cliente de um *broker* MQTT, pode publicar e subscrever os diferentes tópicos. A implementação desta comunicação depende sobretudo das características do *broker* que, neste caso, é aberto e requer autenticação e encriptação por TLS para assegurar que a partilha de informação é segura. Além da identificação do utilizador e da respetiva *password*, são necessários dois certificados de autenticação, o *Certificate Authority* (CA) e o do cliente, e uma chave privada para a descriptação.

Depois da configuração, o primeiro tópico MQTT em que o *gateway* publica é no de *Last Will and Testament*, que permite notificar os restantes clientes quando um se desconecta de forma inesperada.

5.5.2 Modo de Operação

Depois das configurações iniciais e de estabelecer comunicação, o *gateway* publica dados em diferentes tópicos do *broker* com uma periodicidade de 10 minutos, sendo este valor configurável. Estes tópicos consistem em *strings* hierarquicamente estruturados e separados por barras ("/"). O tópico principal é denominado de "ebox" e como a dimensão de dados publicados é variável, uma vez que o número de estações capazes de comunicar não é fixo, existe uma rede de tópicos atribuídos a cada *gateway* e a cada estação que comunique com ele. De forma a organizar o tipo de comunicação entre o sistema e o servidor, cada um deles é ainda dividido nos tópicos seguintes:

- *dr* - com o significado de *data report*, consiste na publicação de tramas de dados do *gateway* e das estações de monitorização;
- *fe* - significa *function execute* e traduz o envio de um comando que gera uma ação no sistema;
- *fa* - o *function acknowledge* consiste na resposta do *gateway* ao pedido feito pelo servidor (*fe*).

Desta forma, a rede de tópicos segue uma estrutura comum aos diferentes dispositivos, *ebox/dispositivo/tipo_de_tópico/parâmetro*, do qual:

- *ebox* - representa os sistemas de monitorização no *broker*, sendo que é a abreviatura de *environmental box*;
- *dispositivo* - identificação do equipamento. A *string* é composta pela designação (EGW no caso de ser um *gateway* e EB para as estações de monitorização) e pelo número de série, para garantir a disparidade dos tópicos;
- *tipo_de_tópico* - pode assumir o valor de *dr*, *fe* ou *fa*;
- *parâmetro* - é referente ao tipo de dado a publicar (variável ou estrutura).

De acordo com a periodicidade estipulada, uma estrutura de parâmetros do sistema (Listagem 5.3) é publicada no tópico próprio (*ebox/EGWc77dc/dr/info*, em que 'c77dc' corresponde ao SN e 'info' é referente às informações do dispositivo) e consiste num *dictionary* do tipo *key-value*, no qual as *keys* correspondem a parâmetros do *device* e o *value* ao seu estado atual. A estrutura contém informação específica do sistema (designação, versão de *firmware* e o número de série) e dos sistemas de monitorização conectados (uma lista na qual são incluídos os SN).

```

1 {
2     "asset": "EnviBoxGW",
3     "connected_devices": [],
4     "fw_v": 0.1,
5     "SN": "EGWc77dc"
6 }
```

Listagem 5.3: Estrutura de dados do *gateway*.

O comportamento do sistema só é alterado quando uma mensagem, proveniente do módulo de rádio LoRa, é recebida (na função de interrupção). Aí é necessário fazer o *parsing* da trama para a validar, isto é, para garantir que foi enviada por uma estação de monitorização. Esta aprovação depende de vários fatores, tais como: o tamanho da trama enviada, se é possível ser separada em pontos e vírgulas e, caso seja, se o segundo campo corresponde a um *epoch time* e se o terceiro corresponde a um dos tipos de mensagem mencionadas na sub-secção 5.4.3 (*keepalive*, *low_battery* e *data*). Como o sistema é dinâmico e está preparado para receber mensagens de qualquer estação de monitorização (logo que tenham um número de série diferente e a trama recebida seja válida), sempre que o *gateway* recebe pela primeira vez uma mensagem de *keepalive* ou de *low_battery* (se for de *data* é ignorada por não ter informações relativas à versão de *hardware* e de *firmware*) de um novo dispositivo, é criada uma estrutura de dados relativa ao mesmo. Quando a estrutura já existe, apenas é atualizada com os últimos dados recebidos. Como esta contém informações distintas, a sua publicação é dividida em três tópicos (considerando o SN da estação como '0001'):

- *ebox/EB0001/dr/lwt* - traduz o estado da comunicação com a *box*. Se ao longo de quatro publicações consecutivas no *broker* a comunicação entre o *gateway* e o sistema de monitorização falhar, é publicado '*Offline*' no tópico e a estrutura de dados é eliminada do sistema;
- *ebox/EB0001/dr/info* - conjunto de parâmetros da estação com a qual o *gateway* estabeleceu comunicação (presentes na Listagem 5.4) no qual:
 - *connected_gateway* - designação do *gateway* que publicou no tópico (para o caso da estação conseguir comunicar com múltiplos)
 - *fw_v* - versão de *firmware*;
 - *hw_v* - versão de *hardware*;
 - *last_report* - tipo da última mensagem recebida
 - *SN* - designação da estação

- timestamp - *epoch time* da mensagem enviada por parte do sistema de monitorização;
- *ebox/EB0001/dr/data* - estrutura de dados recolhidos pela estação que é publicada na mesma sequência da mencionada na Listagem 5.2

```

1 {
2   "connected_gateway": "EGWc77dc",
3   "fw_v": 0.1,
4   "hw_v": 0.1,
5   "last_report": "keepalive",
6   "SN": "EB0001",
7   "timestamp": 1634311301
8 }

```

Listagem 5.4: Estrutura de dados do sistema de monitorização

Para validar a publicação dos diferentes dispositivos no *broker*, foi utilizado o MQTT Explorer, que consiste num cliente MQTT que fornece uma estrutura organizada dos diferentes tópicos e que desta forma permite validar a comunicação entre os diferentes intervenientes. Um exemplo que descreve o estado dos diferente tópicos anteriormente apresentados encontra-se na Figura 5.19, na qual está presente a informação sobre um *gateway* e uma estação de monitorização.

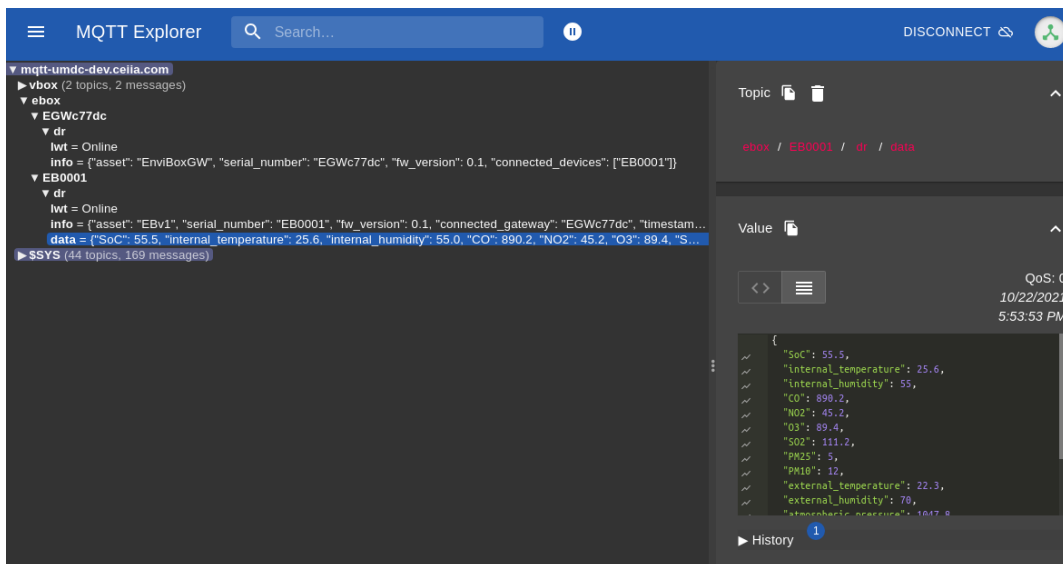


Figura 5.19: Demonstração da publicação de dados dos *devices* no *broker*

Depois de criar a estrutura, o sistema subscreve o tópico (do tipo *function execute*) na qual o servidor publica as alterações de parâmetros de determinada estação

de monitorização: *ebox/EB0001/fe/update_properties* (considerando o mesmo SN). No tópico *update_properties* é publicado um conjunto de dados em formato *Java Script Object Notation* (JSON) que, depois de serem validados pelo *gateway*, são guardados para que, quando o sistema de monitorização em causa volte a comunicar, seja construída a mensagem com a numeração do parâmetro e o seu valor (no formato apresentado na sub-secção 5.4.3). Depois da trama com os novos parâmetros ser enviada a partir do módulo de rádio, é publicado no tópico de *fa* (*ebox/EB0001/fa/update_properties*) o valor lógico *True*.

5.6 Interface Gráfica

Para aumentar a interação com os diferentes dispositivos (estação de monitorização e *gateway*), foi desenvolvida uma interface gráfica. O seu objetivo é permitir a observação dos dados medidos e das características dos *devices* em tempo real, e a configuração dos parâmetros do sistema anteriormente descritos. A ferramenta na qual foi desenvolvida a interface foi criada pela IBM Emerging Technology, e é denominada de Node-RED. A plataforma, baseada em fluxos, contém imensos *nodes* criados em JavaScript e NodeJS, que permitem criar aplicações de forma simples e intuitiva.

Neste caso, foram incluídos *nodes* que estabelecem comunicação com um *broker* MQTT (com o mesmo nível de acesso dos descritos na secção 5.5.1) e que subscrevem os diferentes tópicos de publicação do *gateway*. A partir destes, é apresentado no painel da aplicação os diferentes parâmetros medidos e o estado da ligação com cada dispositivo. É também incluído um nó que permite visualizar a localização dos diferentes dispositivos num mapa. A segunda janela da interface permite configurar a estação de monitorização, através da seleção dos diferentes parâmetros e com a atribuição do respetivo valor, sendo esta informação publicada no tópico de *fe* da estação em causa no formato JSON. O aspeto geral da interface desenvolvida encontra-se presente na Figura 5.20.

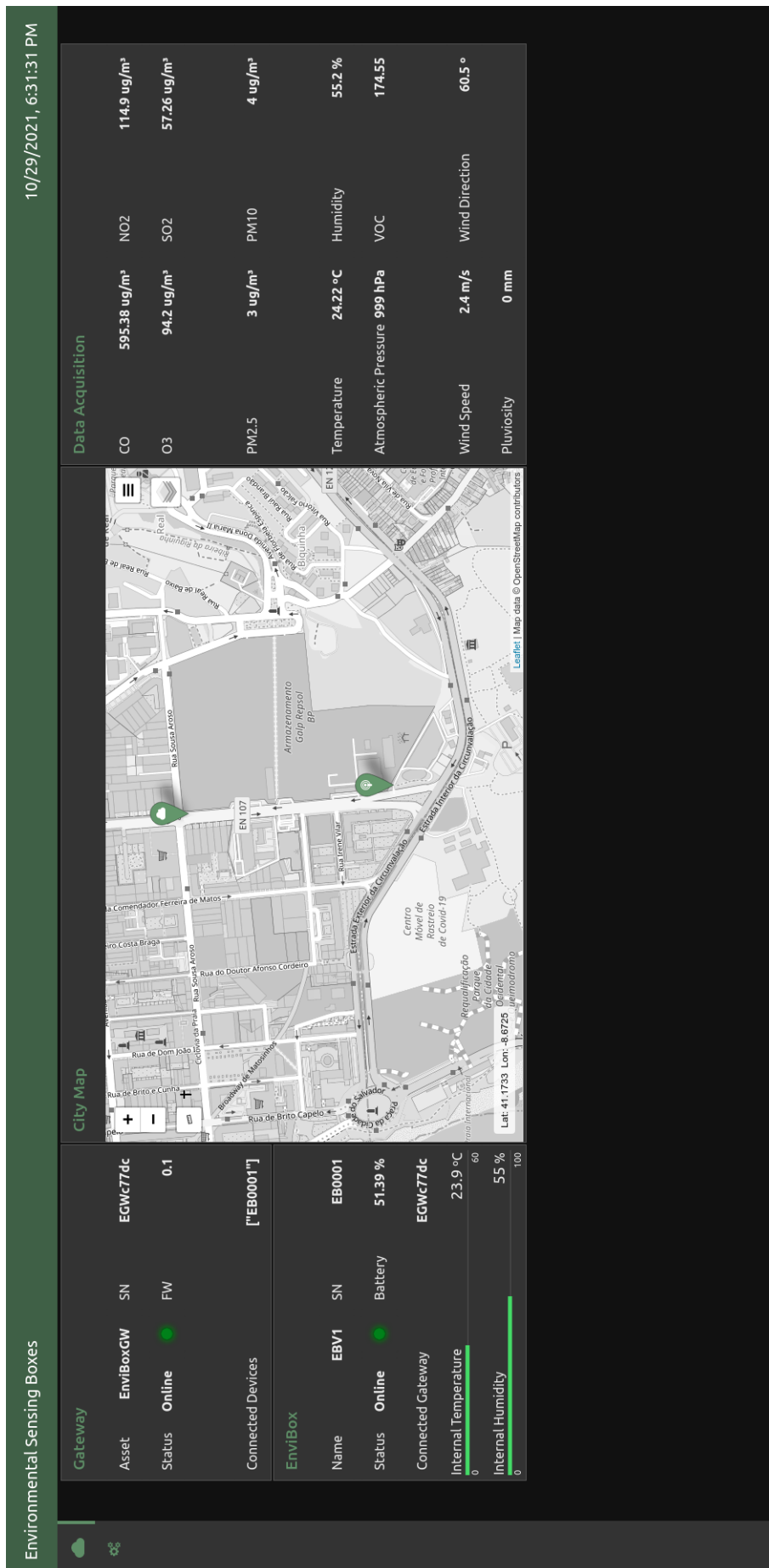


Figura 5.20: Interface gráfica de visualização dos parâmetros ambientais em tempo real

Capítulo 6

Resultados

A implementação dos diferentes sistemas descritos nos capítulos anteriores permitiram a validação do conceito apresentado em diferentes vertentes: funcionamento do sistema, baixos consumos que garantem longos períodos de atividade, comunicação a média distância, e qualidade dos dados adquiridos. Os resultados foram obtidos a partir dos protótipos construídos e são apresentados nas secções seguintes.

6.1 Consumo do sistema de monitorização

Para validar a previsão de consumo energético do sistema, foi analisado o consumo nas diferentes situações, isto é, num ciclo horário de funcionamento. O período de cada modo de operação foi definido com base na Tabela B.1, isto é, o envio de uma mensagem de *keepalive* e consequente receção de tramas por LoRa ocorre a cada 15 minutos (a duração total estimada era de 30 segundos) e as recolhas de dados acontecem de hora a hora, com uma duração de 3 minutos. Através do gráfico presente na Figura 6.1 é possível diferenciar o estado do sistema, através do consumo instantâneo: modo adormecido abaixo dos 50 mA; *keepalive*/receção de dados (estes têm consumos iguais por terem os mesmos periféricos ativos) entre os 50 e 300 mA; e a aquisição de dados com valores superiores a 350 mA. O elevado consumo no estado de *keepalive* (em comparação com o valor previsto) não se traduz ao longo de toda a operação, sendo este pico justificado pelo consumo do microcontrolador no seu arranque (cerca de 250 mA durante 3 segundos). Esta afirmação é verificada no

gráfico presente na Figura 6.2, no qual são apresentados os consumos de cada modo (desde que o MCU é iniciado a partir do alarme do RTC) e o valor esperado.

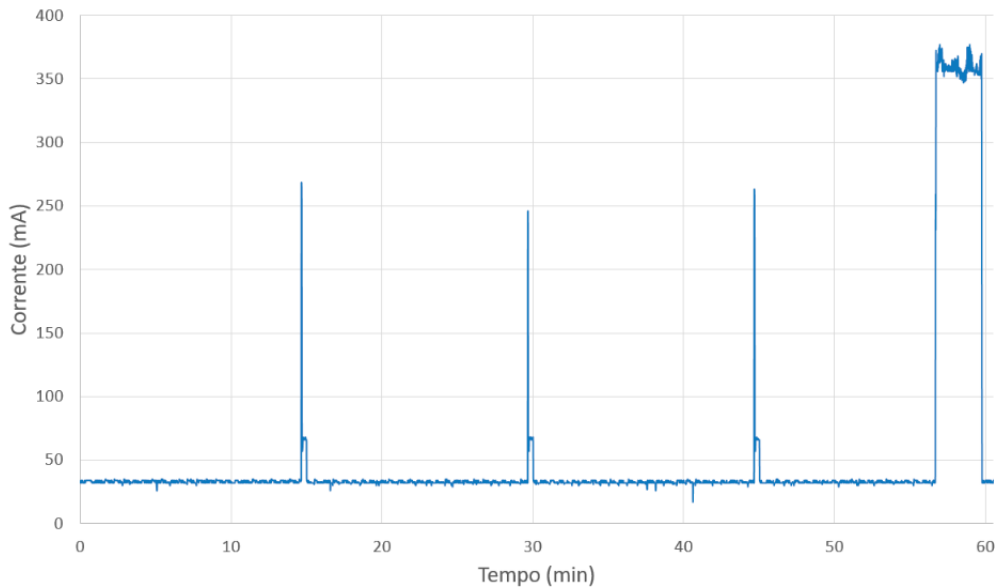


Figura 6.1: Consumo do sistema ao longo de um ciclo de funcionamento

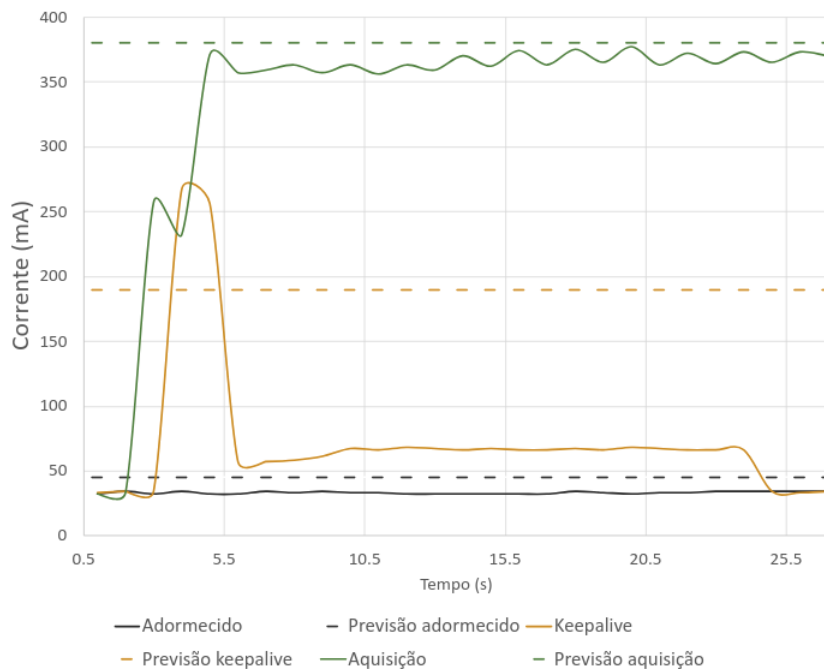


Figura 6.2: Consumo de cada modo do sistema

Em todos os modos de operação, o consumo medido foi sempre inferior ao previsto. Estes valores são justificáveis na medida em que alguns dos sensores não

apresentavam o consumo mencionado pelo fabricante, sobretudo as *boards* ISB da Alphasense que estão sempre alimentadas e desta forma a redução é traduzida em todos os estados e no consumo horário. Esta redução implica de forma direta a duração da bateria sem carregamento, uma vez que o valor previsto era de 8 dias e 7 horas com um consumo de médio de 67,33 mAh, e como a média adquirida foi de 50,23 mAh, a previsão passou para 10 dias e meio.

6.2 Produção energética

A inclusão de um painel como única fonte energética do sistema necessita da garantia de que este é capaz de produzir o suficiente para alimentar os diferentes periféricos e carregar as baterias. Neste sentido, foram feitos testes que relacionam a produção diária do painel solar e o comportamento do módulo de gestão de energia (DFR0535) quando o painel não é capaz de produzir o suficiente para alimentar os sensores. Foi montado um *setup* de testes (Figura 6.3) na qual foi incluído os módulos descritos (painel, *board* de carregamento e distribuição de *power*, e baterias) e, ao invés dos restantes periféricos (microcontrolador, sensores, entre outros), foi incluída uma carga fixa de 5Ω . Com o auxílio de multímetros com *data logger*, foi registado, a uma frequência de 1 Hz, a saída do painel solar (tensão e corrente) e a corrente de *input/output* da bateria.

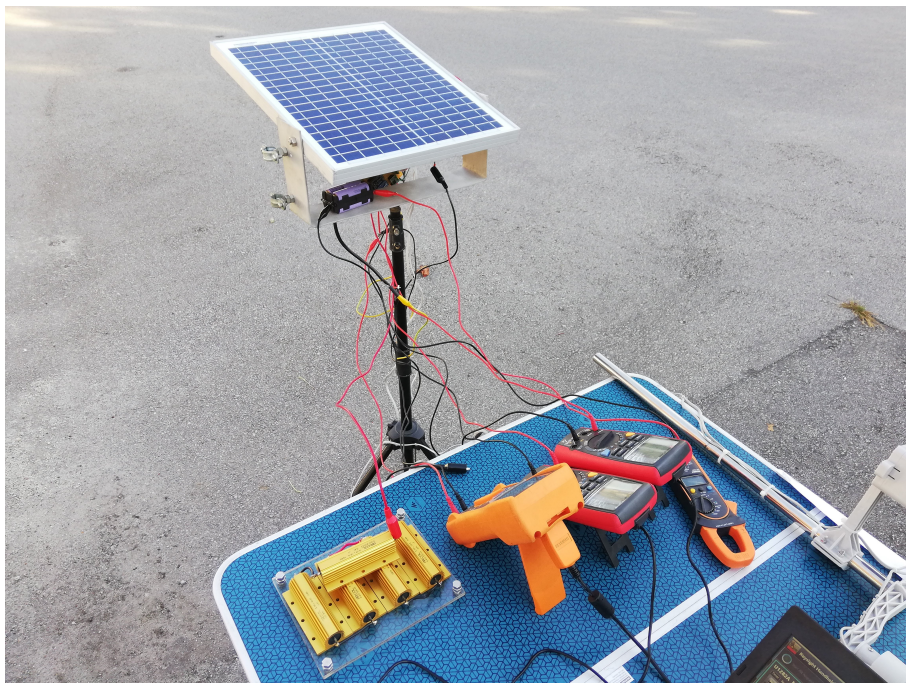


Figura 6.3: Sistema de testes para análise da produção energética do sistema

Da análise dos resultados obtidos foi possível identificar a produção média horária do painel num dia de sol (Figura 6.4). A potência gerada nas condições anteriormente descritas, e considerando como período ativo a exposição do sistema ao sol entre as 9h e as 19h, resultam numa produção média de 5,47 W por hora e numa produção diária de 54,69 W.

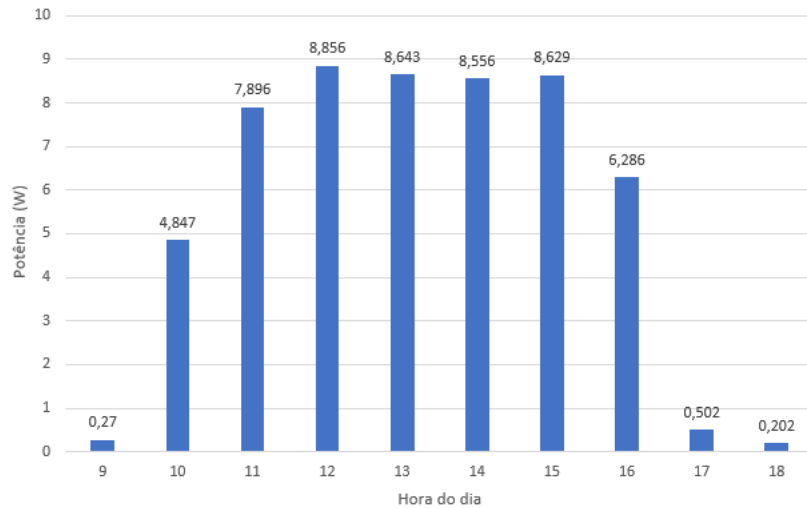


Figura 6.4: Produção horária da potência do sistema

De forma a garantir que durante um dia o sistema é capaz de carregar as baterias e de alimentar a carga de 5Ω , foi analisado o comportamento da corrente de entrada/saída da bateria e da potência produzida pelo painel solar no mesmo período. Esta relação, apresentada nos gráficos da Figura 6.5, traduz a capacidade do sistema em manter a potência de saída (da *board* de *power management*) quando o painel não é capaz de produzir, uma vez que o valor da corrente da bateria passa a negativo, isto é, esta começa a descarregar. A diferença do estado da bateria é visível a partir da separação de estados, representada na linha azul da Figura 6.5b, sendo que qualquer valor positivo corresponde ao carregamento e negativo à descarga. Durante este teste, foram ainda monitorizados a tensão inicial e final da bateria, que partiu de um estado praticamente descarregado, sendo estes 3,13 V e 3,41 V, respetivamente. Durante os diferentes testes, o valor máximo de carregamento foi de 405 mA com uma potência de saída máxima de 9,33 W. Estes resultados traduzem a capacidade do sistema em fornecer energia suficiente para alimentar os módulos e carregar as baterias, uma vez que a carga normal na saída não é tão elevada como a utilizada neste teste (resistência de 5Ω).

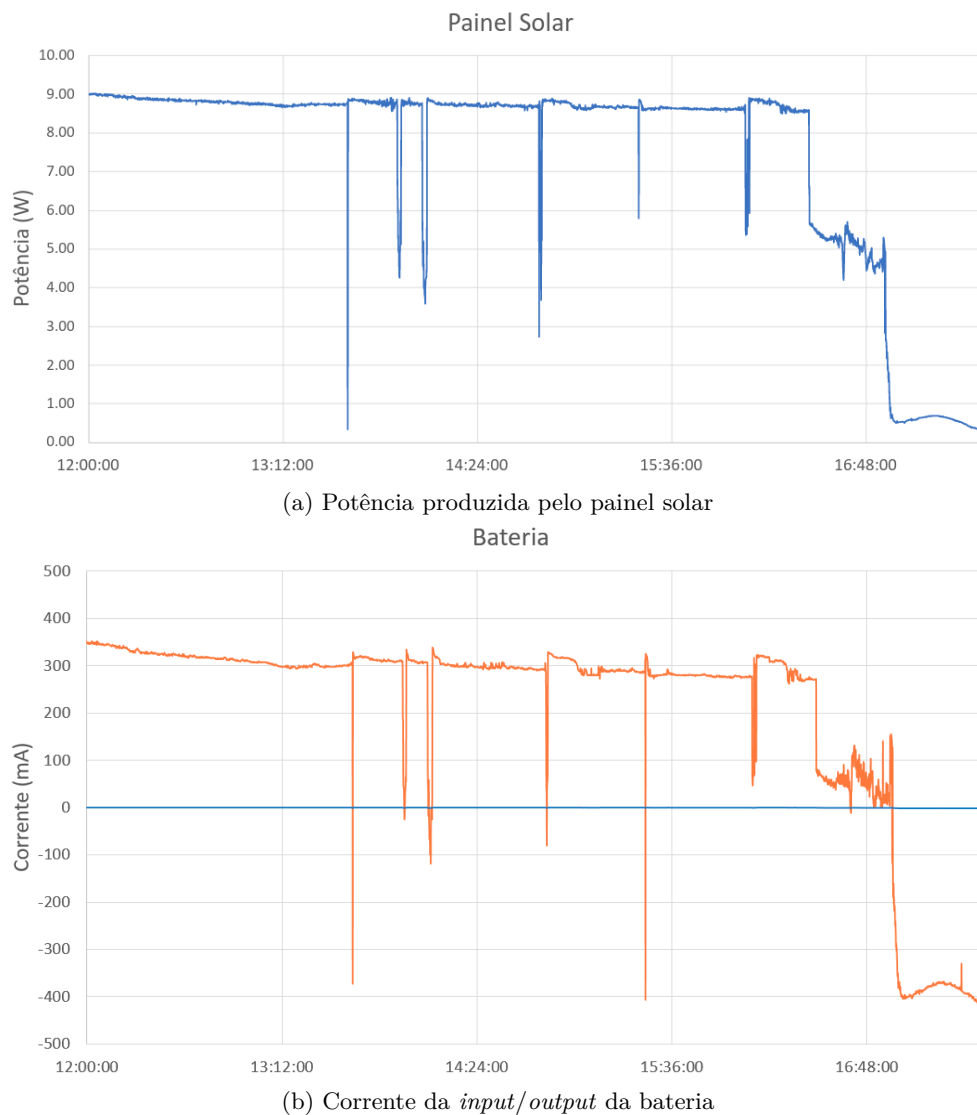


Figura 6.5: Comparação entre a potência de saída do painel e a corrente da bateria

6.3 Alcance da comunicação

A comunicação LoRa entre o dispositivo de monitorização e o *gateway* foi validada, através de inúmeros testes, em diferentes meios (urbano e rural) e sobre diferentes características da camada física. Como os resultados diferem nos dois meios, estes são divididos e apresentados nas secções seguintes.

6.3.1 Meio urbano

O sistema de comunicação, testado entre a cidade de Matosinhos e do Porto, consistiu na fixação do *gateway* e na variação da posição da estação de monitorização ao longo de 7 pontos distintos. Esta representação encontra-se na Figura 6.6 no

qual o *gateway* é exposto como ponto verde, e os restantes pontos numerados correspondem aos locais de teste da comunicação (estações de monitorização) por ordem ascendente de distância para o *gateway*.

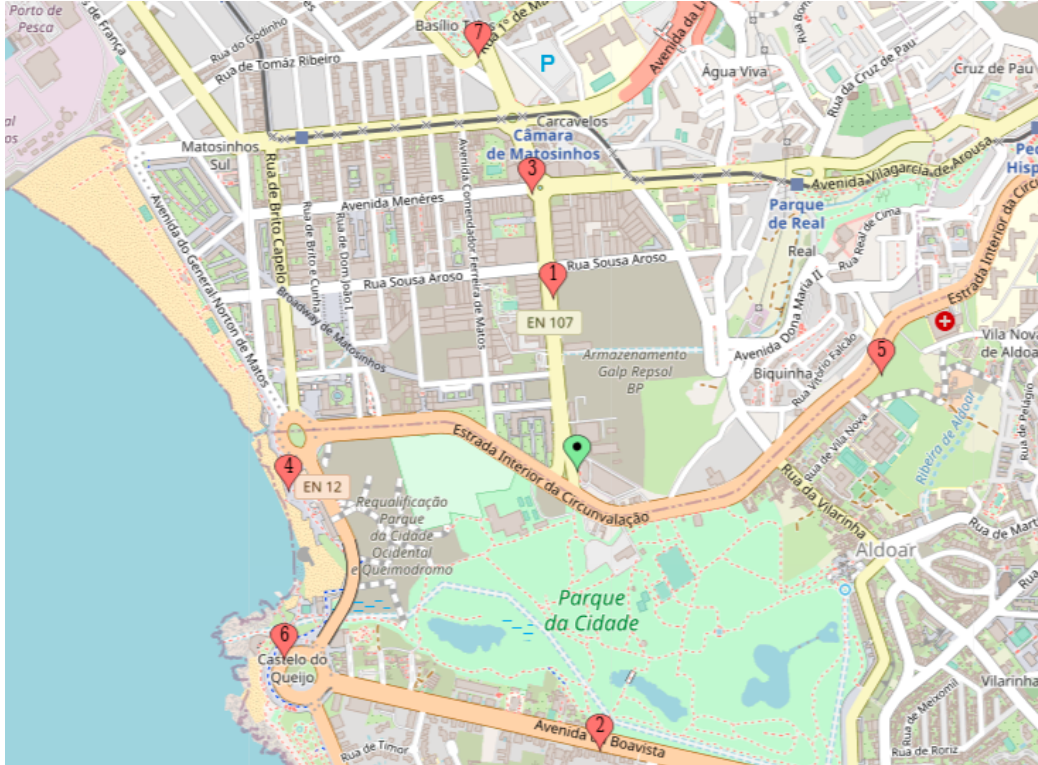


Figura 6.6: Pontos de teste da comunicação LoRa num meio urbano

O processo de testagem consistiu no envio de 8 mensagens longas (com tamanho superior a 86 caracteres) e 8 curtas (30 caracteres) para cada configuração. Esta depende sempre de dois fatores que estão relacionados com a taxa de transmissão, sensibilidade e alcance da comunicação: o *Spreading Factor*, que assume o valor de 7, 10 ou 11, e da *bandwidth* que varia entre 125 e 250 kHz. Os resultados, presentes na Tabela 6.1, traduzem a relação entre o local, a altitude (comparativamente ao nível médio do mar), a distância ao *gateway* e a taxa de sucesso da receção por parte deste. A receção da trama não significa que esta seja válida, isto é, não é garantido que chegue completa ou distorcida. Deste modo, foi incluído na tabela a percentagem de tramas recebidas que são válidas (na qual é possível fazer o *parsing*).

Tabela 6.1: Resultado da comunicação LoRa a partir de diferentes pontos urbanos

Local	Altitude (m)	Distância (m)	SF	BW (kHz)	Receção (%)		Trama válida (%)	
					Curta	Longa	Curta	Longa
1	14	442	7	125	87,5	100	100	100
				250	100	75	87,5	16,66
			10	125	100	100	100	87,5
				250	100	100	100	100
			11	125	100	100	100	50
				250	100	100	100	87,5
3	16	711	7	125	0	0	0	0
				250	0	0	0	0
			10	125	37,5	0	100	0
				250	25	0	50	0
			11	125	100	37,5	87,5	0
				250	0	0	0	0
4	6	735	7	125	0	0	0	0
				250	0	0	0	0
			10	125	87,5	87,5	100	71,4
				250	75	25	100	50
			11	125	100	75	100	16,66
				250	100	62,5	100	40
5	47	809,5	7	125	0	0	0	0
				250	0	0	0	0
			10	125	12,5	0	100	0
				250	62,5	25	100	50
			11	125	87,5	100	100	75
				250	87,5	87,5	100	57,14
6	6	882	7	125	0	0	0	0
				250	0	0	0	0
			10	125	100	100	100	87,5
				250	87,5	100	100	100
			11	125	100	100	100	62,5
				250	100	100	100	62,5

Através da análise dos resultados obtidos em contexto citadino, é possível concluir que, apesar da taxa de sucesso estar relacionada com os parâmetros da camada física, esta não se traduz de forma direta com a distância. Esta relação verifica-se no ponto 2 da Figura 6.6 que, apesar de ser o segundo mais próximo do *gateway*, a uma distância de 710 metros, não foi possível estabelecer comunicação em nenhuma das condições. O mesmo acontece com o mais distante (ponto 7), que se encontra a 1100 metros com uma taxa de receção nula. Devido ao insucesso da comunicação LoRa através destes pontos, os respetivos resultados não foram incluídos na Tabela 6.1.

Nas restantes situações, os resultados mais significativos são os que apresentam uma taxa de sucesso mais elevada na transmissão de tramas longas a média/longa distância (confirmando a relação apresentada na Figura 4.6). Deste ponto de vista, a taxa é superior quando o SF é elevado (10 ou 11) nas situações em que a *bandwidth* (*BW* na tabela) corresponde a 125 kHz. Um dos resultados mais promissores acontece numa das posições mais distantes, o ponto 6, que se encontra a 882 metros do *gateway*. Isto resulta do facto do dispositivo de monitorização se encontrar praticamente em linha de visão com o *gateway*, isto é, apesar das altitudes divergirem, não existem construções de elevadas dimensões ou alta vegetação entre os dois pontos. O mesmo resultado acontece no ponto 1, apesar da distância ser inferior. Nos restantes casos acontece o contrário, ou seja, existem diversos obstáculos entre os pontos de comunicação e que resultam numa baixa taxa de sucesso, sobretudo nos pontos 2 e 7 em que a densidade é elevada. A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que é extremamente importante a localização da implementação do sistema de monitorização face ao *gateway*, para garantir uma boa qualidade de serviço.

6.3.2 Meio rural

A validação duma tecnologia é sempre dependente do meio em que é aplicada. Neste sentido, e para detetar eventuais diferenças com o ambiente urbano, a comunicação foi validada num meio rural com pontos de testagem mais distantes mas sempre em linha de visão com o *gateway*. A representação destes encontra-se na Figura 6.7, na qual o *gateway* surge representado a verde e é o mais baixo a nível de altitude (287 metros), e os restantes pontos, numerados de 1 a 3, correspondem aos locais em que a comunicação foi testada por ordem crescente de distância.

Face ao relevo do terreno, os pontos de teste correspondem a elevadas altitudes na região. A partir destas condições apenas são enviadas, a partir da estação de monitorização, tramas longas. Os resultados do envio destas a partir dos três pontos selecionados estão presentes na Tabela 6.2. Os resultados diferem muito dos obtidos em ambiente urbano, alcançando a taxa máxima de sucesso a uma distância de 7300 metros do *gateway* com *Spreading Factor* (SF) elevados (6500 metros superior ao máximo registado na Tabela 6.1). Estes valores traduzem a qualidade da tecnologia em ambientes amplos e em pontos em linha de vista, sobretudo porque em ambientes urbanos há exposição a outros tipos de comunicação de rádio.

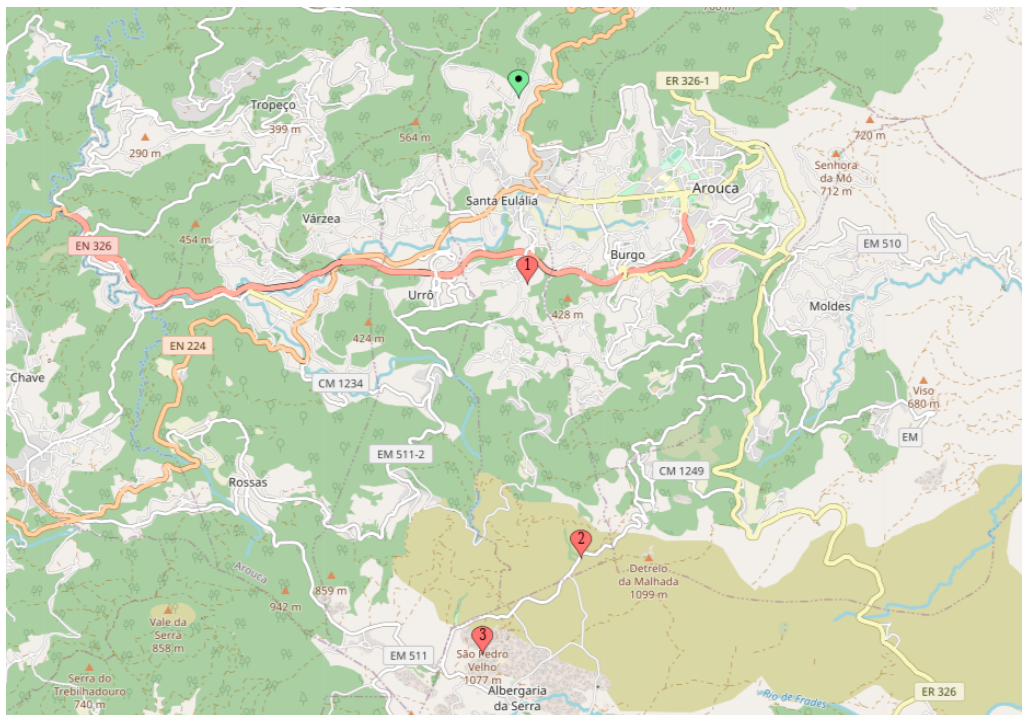


Figura 6.7: Pontos de teste da comunicação LoRa num meio rural

Tabela 6.2: Resultado da comunicação LoRa a partir de diferentes pontos rurais

Local	Altitude (m)	Distância (m)	SF	BW (kHz)	Receção (%)	Trama válida (%)
1	347	2400	6	125	100	50
				250	87,5	14,28
			10	125	100	100
				250	100	100
11	125	100	50			
	250	100	100			
2	1023	6200	7	125	0	0
				250	0	0
			10	125	100	87,5
				250	0	0
11	125	100	50			
	250	62,5	60			
3	1077	7300	7	125	0	0
				250	0	0
			10	125	100	100
				250	100	100
11	125	100	62,5			
	250	100	100			

6.4 Aquisição de Dados

A análise da qualidade dos dados adquiridos por uma estação de monitorização depende de diferentes fatores comparativos e analíticos. A forma tradicional de analisar e determinar o nível de confiança é comparar as medições com os dados de estações oficiais, em Portugal as que pertencem à rede da Agência Portuguesa do Ambiente. Além disso, é importante identificar a influência de determinados parâmetros ambientais na aquisição sensorial para que, desta forma, se criem alternativas para os contornar. Neste sentido, foram adquiridos dados em diferentes ambientes para validar o sistema desenvolvido. O plano de testes consistiu sempre na aquisição de dados ao lado de estações de monitorização (exemplificado na Figura 6.8) para que os diferentes fatores fossem analisados, tendo o plano sofrido adaptações face ao seu contexto. Os dados destas são partilhados pela *European Environment Agency* (EEA) com uma periodicidade horária, sendo este valor reduzido na relação duração/quantidade de amostras.



Figura 6.8: Sistema a recolher dados junto à estação de monitorização João Gomes Laranjo em Matosinhos

6.4.1 Teste 1

A primeira recolha de dados foi efetuada em ambiente urbano, junto à estação João Gomes Laranjo, na cidade de Matosinhos. A sua localização é propícia à análise de poluentes relacionados com o tráfego, sendo estes o PM_{10} , CO e os óxidos de

nitrogénio (NO_x , NO , NO_2). Neste sentido, o sistema foi preparado para recolhas de 14 minutos com uma periodicidade de envio de dados a cada 15 minutos. Foi utilizada a equação sugerida pelo fabricante (apresentada na Tabela E.1 do Anexo E) para o cálculo da concentração dos compostos gasosos (sensores da Alphasense).

Durante o período de amostragem (cerca de 2 horas) a estação fixa apenas reportou medidas de CO e PM_{10} . A comparação destes com os valores calculados é representada nas Figuras 6.9 e 6.10, nas quais as linhas a tracejado dizem respeito à estação fixa e as restantes à estação de monitorização. Segundo o AQI (apresentado na Tabela 2.2), o resultado medido de SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ e PM_{10} é classificado como muito bom, já o valor de O_3 enquadra-se no extremamente mau.

A partir dos resultados obtidos é notória a diferença entre os valores reais e os medidos. Os valores de CO , como resultam de um cálculo que depende de um fator de temperatura, permitem uma análise crítica, ao contrário do sensor de PM_{10} , em que os dados praticamente não são processados. O mesmo é passível para os restantes compostos gasosos, sobretudo o NO_2 que apresenta concentrações tão díspares que nem foram considerados para representação gráfica. Para contornar as contrariedades obtidas nesta recolha, foi planeado um segundo teste para que, sobre o mesmo conjunto de dados fosse calculado o *output* das quatro equações (presentes na sub-seção 5.4.1) para cada poluente.

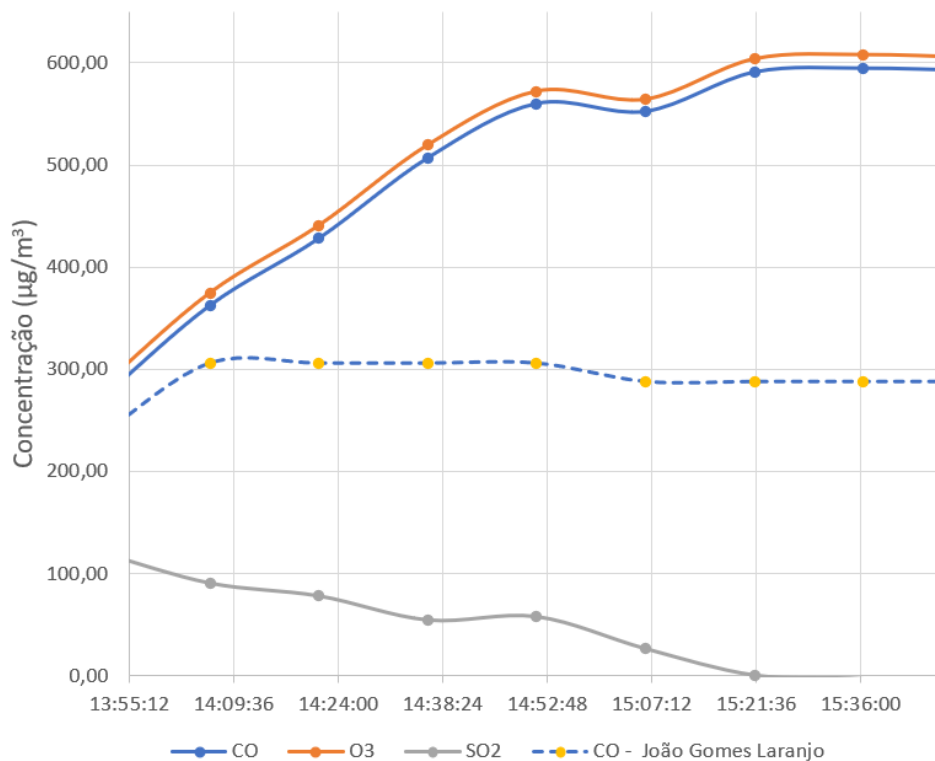


Figura 6.9: Comparação entre as diferentes concentrações medidas no primeiro teste

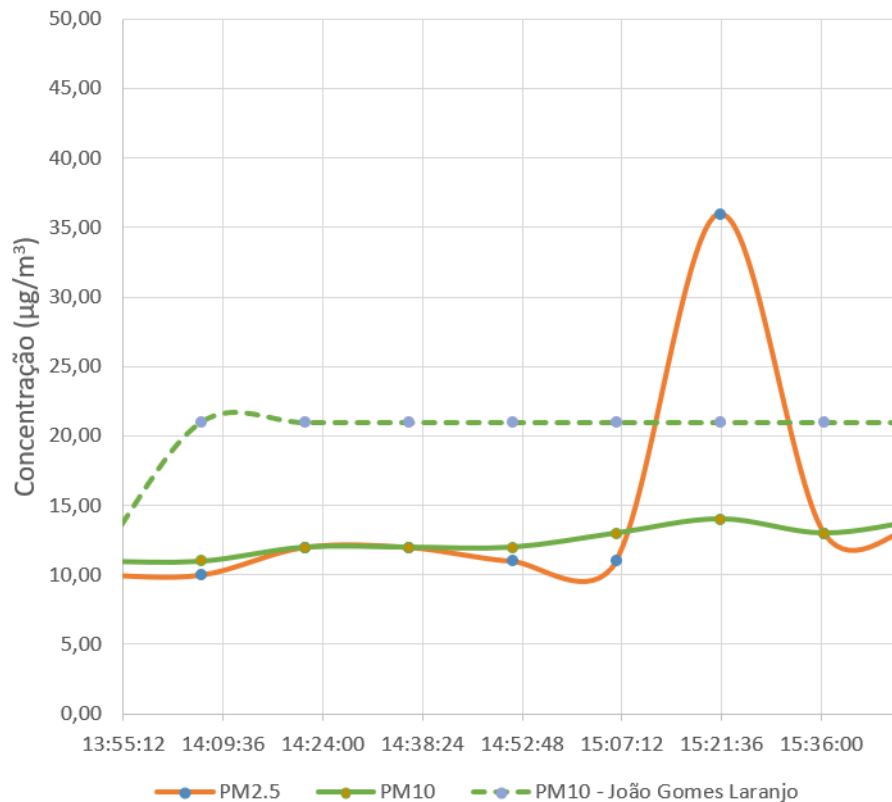


Figura 6.10: Comparação entre as diferentes concentrações medidas no primeiro teste

6.4.2 Teste 2

O segundo teste foi executado numa estação de monitorização diferente do anterior. Foi escolhida a estação fixada em Sobreiras-Lordelo do Ouro, na cidade do Porto, pela quantidade diversificada de poluentes monitorizados: $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , e os óxidos de nitrogénio. A recolha foi efetuada no período da tarde, durante 4 horas, tendo a periodicidade de envio dos dados diminuído para 5 minutos, com médias de 4 minutos de recolha. O objetivo de aumentar a amostragem foi detetar oscilações em períodos mais reduzidos. Todos os parâmetros foram recolhidos de forma normal, à exceção dos sensores eletroquímicos, no qual foram reportados os resultados das diferentes equações. À semelhança do teste 1, os dados disponibilizados ficaram aquém dos monitorizados, uma vez que só foram publicados dados de O_3 . Neste sentido, é apresentado o gráfico que traduz a relação das concentrações calculadas, a partir das equações 5.1, 5.2 e 5.3, e do valor reportado de Ozono pela estação fixa, na Figura 6.11. O resultado da 5.4 é considerado irrelevante porque os dados são irrealistas, isto é, atingem valores negativos na ordem dos milhares. Ao contrário do teste 1, em que os dados foram oscilando de forma suave, como o período de medição foi reduzido, a oscilação deste teste foi verificada em todos os cálculos. Em alguns

casos, a concentração calculada atingiu valores negativos que naturalmente seriam descartados num cenário final.

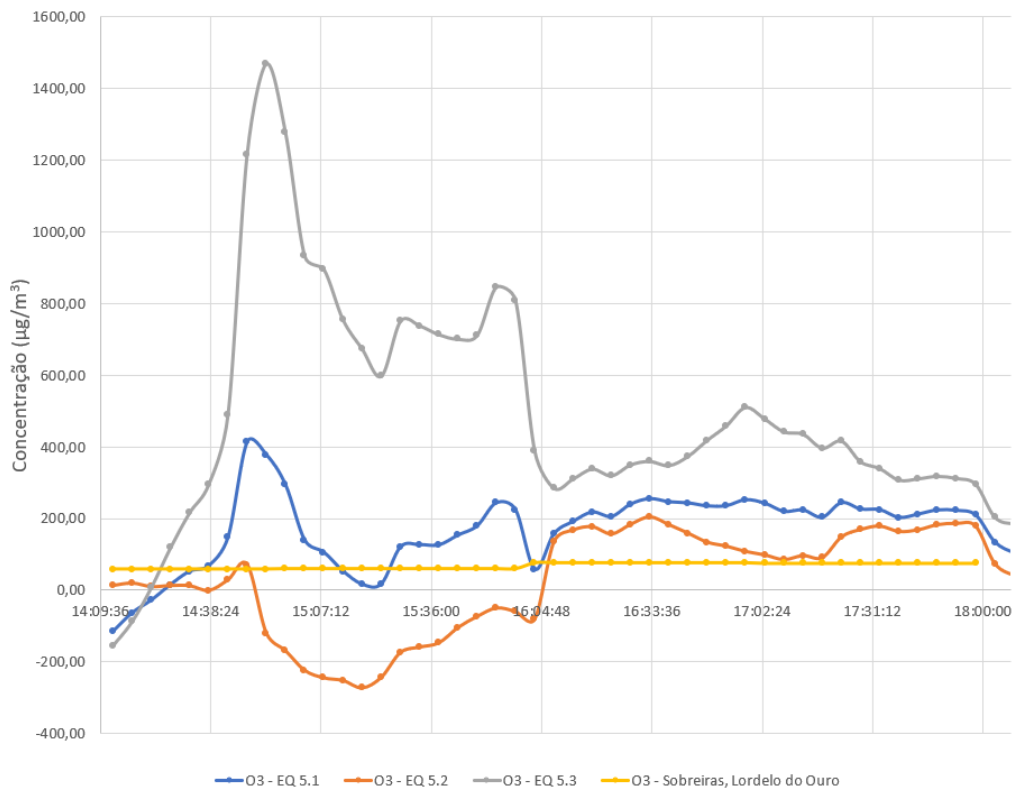


Figura 6.11: Comparação das concentrações de O₃ medidas pelas duas estações

Para o método comparativo ser mais próximo do real, foram calculados o valor médio horário reportado a partir das diferentes equações (6.12). Com base nesta, e à semelhança do resultado apresentado na Figura 6.9, existe um desfasamento entre o valor real e os medidos. No sentido de procurar uma evidência física para tal diferença, recorreu-se aos restantes dados de temperatura e humidade, uma vez que um destes têm influência direta no cálculo de todas as concentrações dos sensores eletroquímicos.

Como o sistema de monitorização foi colocado ao sol durante quase todo o período de aquisição, e a partir da análise do *dataset* adquirido (representado na Figura 6.13) é possível concluir que todos os dados de temperatura foram condicionados pela elevada temperatura da caixa, apesar desta ser aberta. Esta conclusão parte de dois factos: nunca durante o dia foi registado temperaturas superiores a 30 °C em qualquer ponto da cidade, sendo que o valor máximo medido pela estação foi de 38 °C; a partir das 16 horas e durante 40 minutos, o sistema foi colocado à sombra e a temperatura passou de 34,2 °C para 24,9 °C e a humidade de 32 % para 52 %, sendo esta alteração fisicamente improvável tendo em conta o clima em Portugal

continental. Desta forma, todos os valores dos coeficientes de temperatura foram calculados com um elevado erro associado que se traduziu na concentração medida.

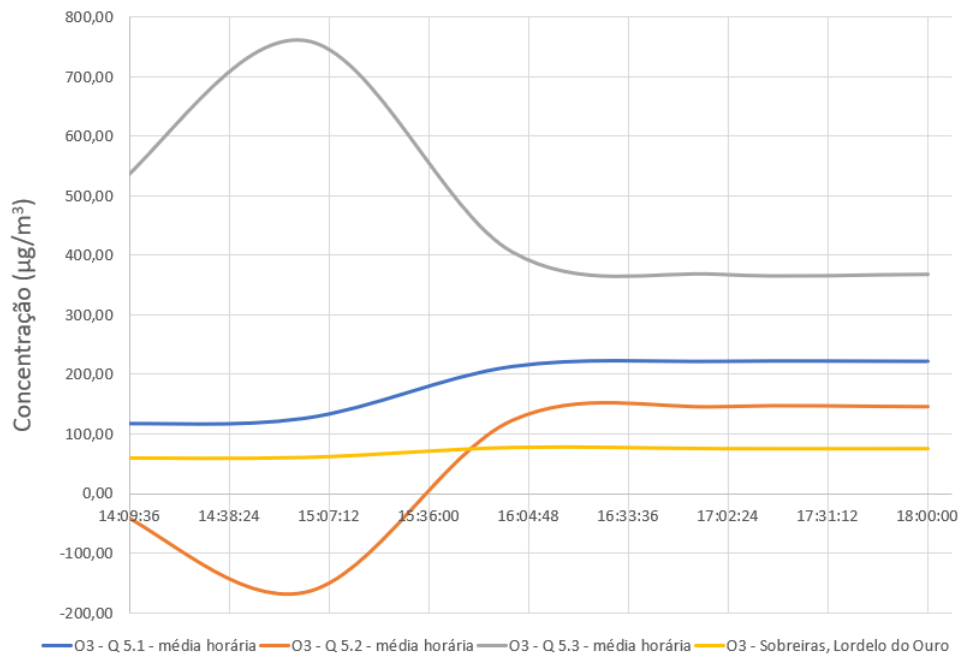


Figura 6.12: Comparação do valor médio horário da concentração de O_3

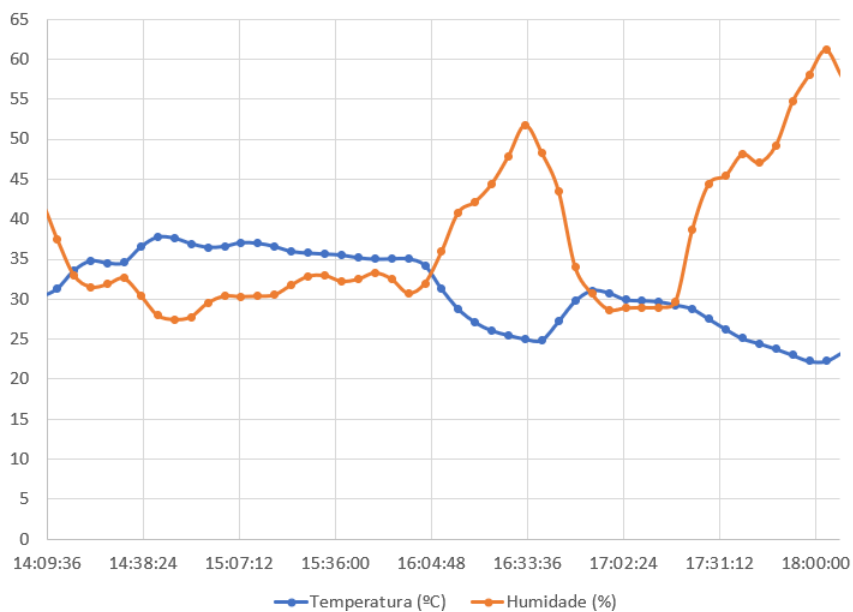


Figura 6.13: Variação da temperatura e da humidade no exterior

Esta relação torna-se ainda mais evidente no cálculo da concentração dos restantes poluentes. Um desses exemplos é representado na Figura 6.14, a de CO. À

semelhança dos restantes, o cálculo da concentração resultante da equação 5.4 foi descartado, sendo o valor da equação 5.1 o que mais se aproxima do real. O efeito da temperatura neste, é visível no mesmo intervalo temporal (a partir das 16 horas) em que a concentração passa de $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $606 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 40 minutos.

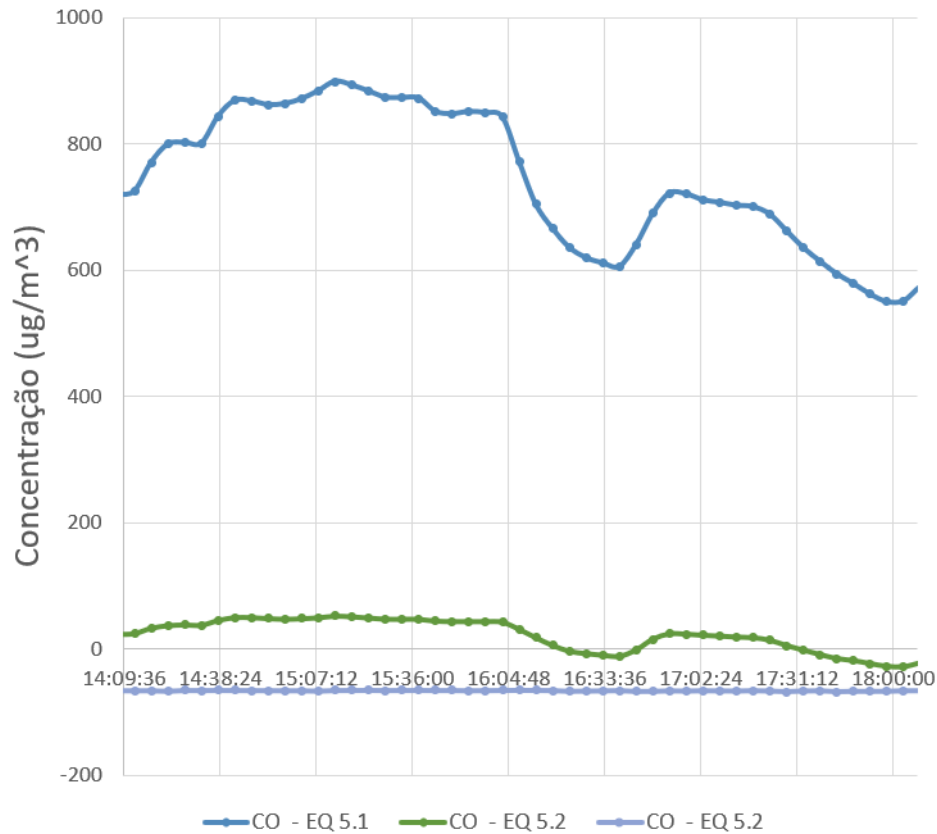


Figura 6.14: Variação da concentração de CO no segundo teste

O resultado deste teste, apesar de não ter ido de encontro ao esperado, porque não permitiu comparar a concentração os 4 poluentes (medidos por ambas as estações), e porque os dados medidos não apresentaram um comportamento espetável; permitiu ainda assim identificar um dos problemas do protótipo desenvolvido. Tendo em conta a importância da temperatura na identificação dos poluentes, é extremamente relevante que o erro associado à sua medição seja minimizado. Neste sentido, e para compreender a relação da medição dos diferentes parâmetros num ambiente mais estável, foi realizado um terceiro teste, em condições semelhantes ao teste 1, mas o sistema foi colocado à sombra para não ser afetado pela temperatura da caixa.

6.4.3 Teste 3

O terceiro teste, realizado no mesmo local do primeiro, tinha como objetivo relacionar o efeito da estabilização da temperatura no cálculo da concentração dos poluentes, comparando-os com os resultados obtidos nos testes anteriores. Para isso, foram definidos, à semelhança do teste 2, 5 minutos como período de envio dos dados recolhidos, para detetar eventuais oscilações nas amostras recolhidas durante cerca de 3 horas.

A estabilidade da temperatura externa medida, representada na Figura 6.15, foi obtida porque a estação foi colocada à sombra, de forma a que a caixa não estivesse exposta à radiação solar, minimizando o erro associado à medição da temperatura. Ao longo do período de teste, o valor foi sempre decrescendo, atingindo uma diferença de 5 °C entre o início e fim dos testes.

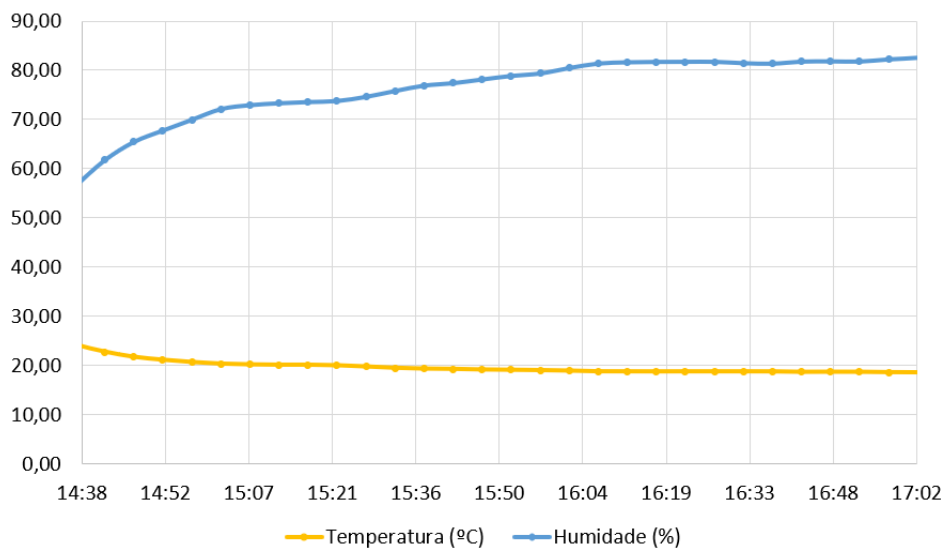


Figura 6.15: Variação da temperatura e da humidade no decorrer do teste 3

Durante o período de amostragem, e à semelhança do teste 2, foram recolhidas as concentrações, resultantes das quatro equações dos quatro poluentes, e todos os restantes parâmetros. Um dos parâmetros comparáveis é a concentração de O_3 resultante de 3 equações (Figura 6.16), uma vez que a estabilidade dos resultados são o oposto dos medidos no teste 2 (Figura 6.11). Esta relação comprova o efeito que a estabilidade da temperatura provoca nas restantes medições, independentemente de não haver uma comparação de O_3 com um valor de referência (a estação em causa não mede o poluente). Este facto traduz-se na observação do desvio médio das medições face ao valor médio das concentrações, que está presente na Tabela 6.3. A diferença do desvio médio entre equações no teste 2 é notória da fraca qualidade

da amostra. Comparando os valores da mesma equação nos diferentes cenários, o resultado é revelador do efeito (previsto) da temperatura.

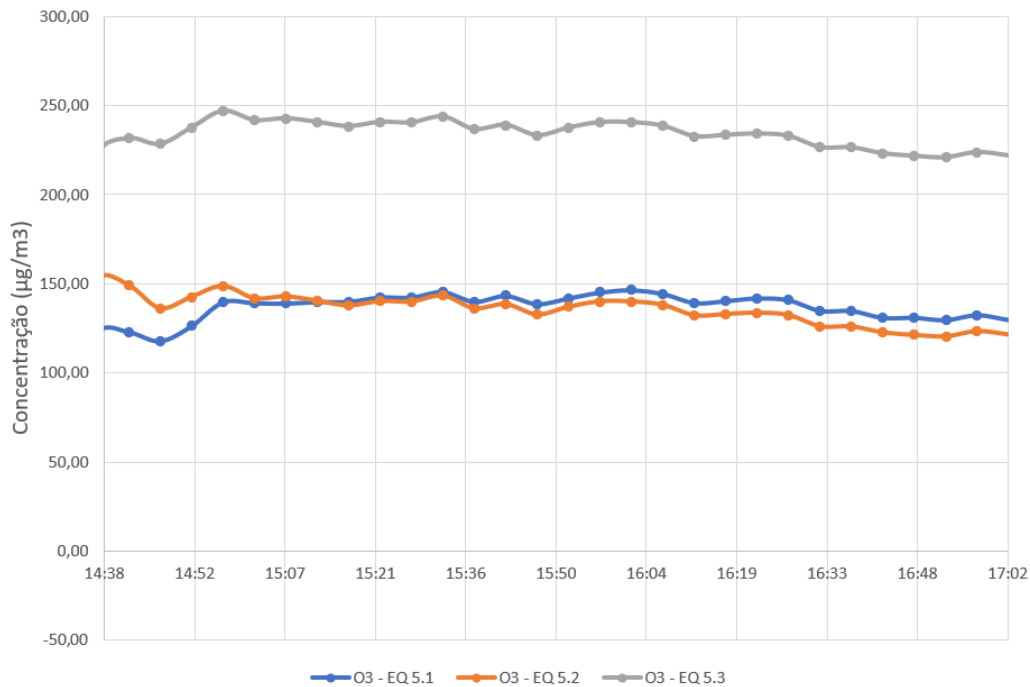


Figura 6.16: Variação da concentração de O₃ calculada a partir das diferentes equações

Tabela 6.3: Comparação entre a concentração média e o desvio médio de O₃ nos diferentes ambientes

Teste	Equação	Concentração média ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desvio médio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2	5.1	162,54	94,70
	5.2	28,26	126,32
	5.3	432,53	278,72
3	5.1	130,14	13,21
	5.2	128,01	15,11
	5.3	227,06	13,46

Em relação aos restantes parâmetros medidos, e como a estação fixa reporta os valores horários de CO e de PM₁₀, é possível comparar a diferença entre os valores medidos por ambas. O resultado da concentração de PM₁₀ é semelhante ao alcançado no primeiro teste (representado na Figura 6.10), no qual existe um desfasamento entre os valores medidos por ambas as estações. Os resultados só podem ser justificados pela baixa qualidade do sensor, uma vez que não existem fatores associados (pelo fabricante) que induzam erros às medições. Já a concentração de CO, representada na Figura 6.17, clarifica a melhoria na medição do poluente em

causa (apesar do desfasamento com o valor real existir), a partir da comparação do resultado obtido no primeiro teste e representado na Figura 6.9. A partir dos dados reportados pela estação fixa, é possível calcular o erro relativo de cada medição, e a partir deste determinar o erro relativo médio do cálculo das concentrações. No primeiro teste este valor foi de 38,26 %, e neste foi reduzido para 30 %, sendo sinónimo de uma melhoria. Esta também é evidente no cálculo que NO_2 , resultante da equação 5.3 e representado na Figura 6.17, que à semelhança dos restantes, não revelou oscilações injustificáveis em toda a amostra.

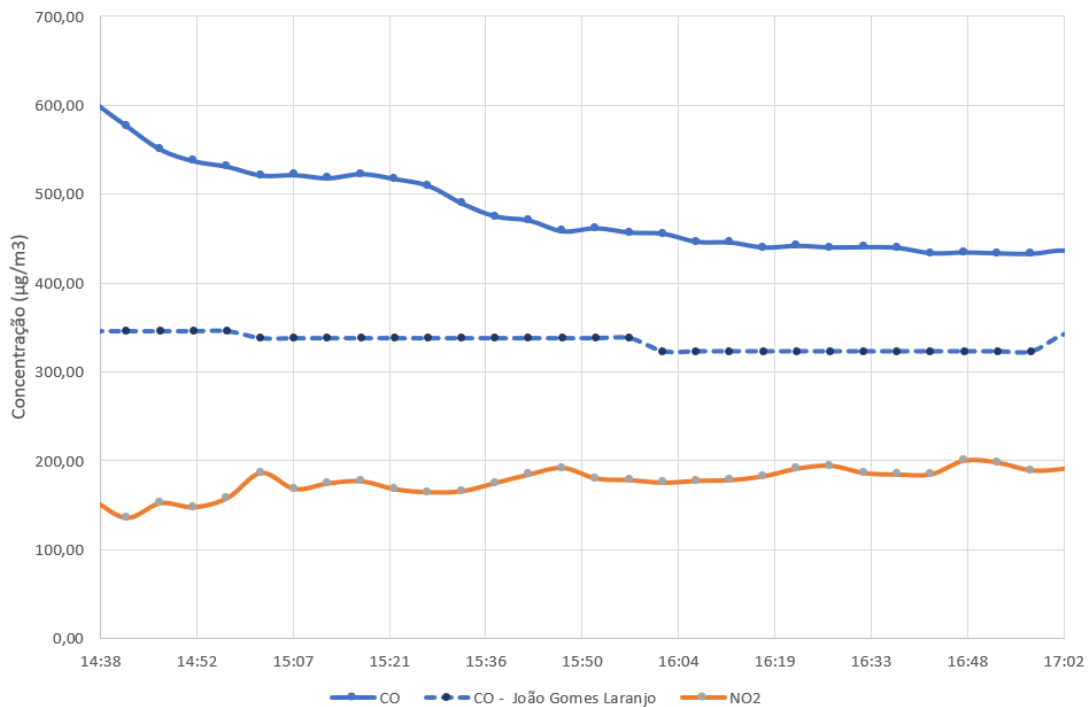


Figura 6.17: Variação de CO e NO_2 no teste 3

Os resultados deste teste, apesar de continuar a traduzir um erro associado às diferentes medições, foi revelador do efeito da temperatura no cálculo das concentrações. A amostra não revelou oscilações não justificáveis nos diferentes poluentes, sendo isto sinónimo da boa precisão da estação, ao contrário da exatidão, que foi mais reduzida. De uma forma geral, como os resultados das estações oficiais são uma média horária, estes acabam por mascarar/filtrar todas as variações das medições, dificultando assim a comparação em períodos reduzidos. Além das medições apresentadas, foram recolhidos dados relacionados com o vento, pressão atmosférica, condições no interior da caixa, entre outros que não foram considerados relevantes pelo autor por não serem alvo de discussão.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

A presente dissertação teve como objetivo primordial o desenvolvimento de um sistema independente, de baixo custo, sem ligação à rede elétrica e capaz de recolher e reportar a concentração de poluentes e fatores ambientais externos em tempo real.

A construção do protótipo da estação revelou-se fundamental para a validação do conceito uma vez que, a partir de um custo reduzido e de um sistema de pequena dimensão, foi desenvolvido um dispositivo configurável, capaz de monitorizar um amplo conjunto de parâmetros ambientais e de ter a sua própria fonte de alimentação sem recorrer à rede elétrica. Com consumos reduzidos e inferiores ao previsto, revelou-se auto-sustentável garantindo o normal funcionamento sobre longos períodos sem receber qualquer carga externa. A nível da comunicação LoRa, manifestou algumas dificuldades em estabelecer contacto em ambientes citadinos, sobretudo quando existem inúmeros obstáculos entre o emissor e o recetor. Contudo, os dados obtidos em contexto rural revelaram que uma das áreas com maior potencial para este tipo de comunicação é a agricultura, pelo facto de ocorrer em terrenos amplos e, em algumas situações, com diferentes altitudes em que existe linha de vista entre os intervenientes.

O *gateway* tornou-se um dispositivo essencial na solução, uma vez que está preparado para comunicar com qualquer estação de monitorização e com o *broker* MQTT. Além de permitir configurar qualquer dispositivo que comunique com ele, é multidisciplinar, isto é, facilmente é implementado um novo protocolo de comunicação a partir da estrutura existente.

Em suma, o planeamento, desenvolvimento e construção de um sistema tão completo em diferentes vertentes tornou-se num desafio. O resultado final traduz o potencial deste tipo de sistemas, tendo em conta o custo de produção e a quantidade de parâmetros que permite identificar.

Em termos de trabalhos futuros era importante analisar alternativas ao módulo de rádio LoRa, sobretudo em ambientes citadinos, implementado por exemplo um módulo NB-IoT, eliminando assim o *gateway* da solução uma vez que a comunicação para o *broker* passaria a ser direta. Outra alternativa poderia passar pela definição de um *gateway* como *end node*, isto é, ter um dispositivo auto sustentável e capaz de reportar dados a partir do local de instalação.

Em relação aos dados adquiridos, e tendo em conta a imprecisão destes em determinadas condições atmosféricas, seria importante aprimorar os fatores externos que influenciam as medições para desta forma reduzir o erro associado. Seria igualmente importante ter longos períodos de dados das diferentes estações de monitorização (a solução apresentada e as fixas), para desta forma compreender se ao longo do tempo os dados convergiram. Esta foi uma das maiores dificuldades encontradas, tendo em conta o longo período de recolha e a reduzida quantidade de amostras. Do ponto de vista físico, há a necessidade de criar um *enclosure* próprio, capaz de albergar toda a eletrónica, com a garantia da preservação do sistema e sobretudo da qualidade dos dados adquiridos.

Por fim, se o produto se tornasse comercializável seria importante analisar o processo de certificação que este tipo de dispositivos é alvo, sobretudo para aplicação em vias públicas.

Referências

- [1] “World Health Statistics 2020: Monitoring Health for SDGs, Sustainable Development Goals,” , World Health Organisation, Geneva, 2020. Acedido em 02/11/2020, Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/332070/9789240005105-eng.pdf>. [Citado na página 1]
- [2] P. A. Owusu and S. A. Sarkodie, “Global estimation of mortality, disability-adjusted life years and welfare cost from exposure to ambient air pollution,” *Science of the Total Environment*, vol. 742, 2020. Acedido em 03/11/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140636>. [Citado na página 1]
- [3] N. Lau, M. J. Smith, A. Sarkar, and Z. Gao, “Effects of low exposure to traffic related air pollution on childhood asthma onset by age 10 years,” *Environmental Research*, vol. 191, 2020. Acedido em 03/11/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110174>. [Citado na página 1]
- [4] S. Khomenko, M. Cirach, E. Pereira-Barboza, N. Mueller, J. Barrera-Gómez, D. Rojas-Rueda, K. de Hoogh, G. Hoek, and M. Nieuwenhuijsen, “Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment,” *The Lancet Planetary Health*, 2021. Acedido em 25/01/2021, Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2). [Citado na página 1]
- [5] V. Smil, *Growth: From Microorganisms to Megacities*. The MIT press, 2019. Capítulo 5, pág: 336-337, Acedido em 20/10/2020. [Citado na página 5]
- [6] “World Urbanization Prospects: The 2018 Revision,” tech. rep., United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York, 2019. Acedido em 05/11/2020, Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. [Citado na página 5]
- [7] Statista, “Smart city initiatives: global spending 2023,” 2020. Acedido: 05/12/2020, Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/884092/worldwide-spending-smart-city-initiatives/>. [Citado na página 6]
- [8] S. Atitallah, M. Driss, and W. Boulila, “Leveraging Deep Learning and IoT big data analytics to support the smart cities development: Review and future directions,” *Computer Science Review*, vol. 38, 2020. Acedido em 05/11/2020,

- Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100303>. [Citado nas páginas 6, 7 e 19]
- [9] A. Villa-Henriksen, G. T. Edwards, L. A. Pesonen, O. Green, and C. A. G. Sørensen, “Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential,” *Biosystems Engineering*, vol. 191, 2020. Acedido em 07/12/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>. [Citado na página 7]
- [10] E. S. A. Ahmed and M. E. Yousef, “Internet of things in Smart Environment: Concept, Applications, Challenges, and Future Directions,” *World Scientific News*, vol. 134, 2019. Acedido em 07/12/2020, Disponível em: <http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2019/06/WSN-1341-2019-1-51-1.pdf>. [Citado na página 7]
- [11] A. S. Mihăiță, L. Dupont, O. Chery, and M. Camargo, “Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 221, 2019. Acedido em 03/11/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.179>. [Citado na página 8]
- [12] E. E. Agency, “Air quality in Europe – 2020 report,” 2020. Acedido em 30/11/2020, Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>. [Citado nas páginas 8, 9 e 10]
- [13] K. Kim, E. Kabir, and S. Kabir, “A review on the human health impact of airborne particulate matter,” *Environment International*, vol. 74, 2015. Acedido em 06/11/2020, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412014002992>. [Citado na página 9]
- [14] M. H. Askariyeh, H. Khreis, and S. Vallamsundar, “Air pollution monitoring and modeling,” in *Traffic-Related Air Pollution* (H. Khreis, M. Nieuwenhuijzen, J. Zietsman, and T. Ramani, eds.), ch. 5, pp. 111–117, Elsevier, 2020. Acedido em 07/11/2020, Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/traffic-related-air-pollution/khreis/978-0-12-818122-5>. [Citado nas páginas 9, 10 e 11]
- [15] D. G. da Saúde, “Qualidade do ar ambiente » efeitos dos poluentes na saúde,” Acedido em 06/11/2020, Disponível em: <https://www.dgs.pt/paginas-de-sistema/saude-de-a-a-z/qualidade-do-ar-ambiente/efeitos-dos-poluentes-na-saude.aspx?fbclid=IwARODNRg5BWefnhRYRoHl2VMp-Q2qUDwR0ZH-z2VBRf7pBy2E4yxHSD0U9U>. [Citado na página 9]

- [16] P. H. Fischer, M. Marra, C. B. Ameling, G. Hoek, R. Beelen, K. de Hoogh, O. Breugelmans, H. Kruize, N. A. Janssen, and D. Houthuijs, “Air Pollution and Mortality in Seven Million Adults: The Dutch, Environmental Longitudinal Study (DUELS),” *Environmental Health Perspectives*, vol. 123, 2015. Acedido em 01/12/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1289/ehp.1408254>. [Citado na página 9]
- [17] W. H. Organisation, “Ambient (outdoor) air pollution,” 2018. Acedido em 06/11/2020, Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Citado na página 9]
- [18] G. dos Açores, “Fontes e efeitos dos Poluentes Atmosféricos.” Acedido em 09/12/2020, Disponível em: <https://www.azores.gov.pt/Gra/srrn-ambiente/conteudos/livres/Fontes+e+efeitos+dos+Poluentes+Atmosf%C3%A9ricos.htm>. [Citado nas páginas 9 e 10]
- [19] United States Environmental Protection Agency, “Basic Information about Carbon Monoxide (Co) Outdoor Air Pollution.” Acedido em 12/12/2020, Disponível em: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO>. [Citado na página 10]
- [20] J. Rose, L. Wang, Q. Xu, C. McTiernan¹, S. Shiva¹, J. Tejero, and M. Gladwin, “Carbon Monoxide Poisoning: Pathogenesis, Management, and Future Directions of Therapy,” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 195, 2016. Acedido em 09/12/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1164/rccm.201606-1275CI>. [Citado na página 10]
- [21] I. Simpson and C. Volosciuk, “Home Resources Bulletin Changing Volatile Organic Compound Emissions in Urban Environments: Many Paths to Cleaner Air,” vol. 68, 2019. Acedido em 08/11/2020, Disponível em: <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/changing-volatile-organic-compound-emissions-urban-environments-many-paths>. [Citado na página 10]
- [22] “Diretiva 2008/50/CE do parlamento Europeu e do Conselho de 21 de maio de 2008 relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa,” *Jornal Oficial da União Europeia*, vol. 029. Acedido em 04/11/2020, Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=EN>. [Citado na página 10]

- [23] Portal diplomático, “Acordo de paris.” Acedido em 18/12/2020, Disponível em: <https://www.portaldiplomatico.mne.gov.pt/politica-externa/temas-multilaterais/acordo-de-paris>. [Citado na página 10]
- [24] Comissão Europeia, “Pacto ecológico europeu.” Acedido em 18/12/2020, Disponível em: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt. [Citado na página 10]
- [25] European Environment Agency, “Air quality standards.” Acedido em 30/11/2020, Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>. [Citado na página 10]
- [26] Diário da República Eletrónico, “APA - Políticas > Ar.” Acedido em 03/01/2021, Disponível em: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=82>. [Citado na página 11]
- [27] European Environment Agency, “European air quality index.” Acedido em 20/12/2020, Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>. [Citado nas páginas 11 e 12]
- [28] Environmental Defense Fund, “Public investment, private innovation: The global market for air quality monitoring,” 2020. Acedido em 26/12/2020, Disponível em: https://business.edf.org/files/AQ-Landscape_Web.pdf. [Citado na página 12]
- [29] G. Camprodon, González, V. Barberán, M. Pérez, V. Smári, M. de Heras, and A. Bizzotto, “Smart Citizen Kit and station: An open environmental monitoring system for citizen participation and scientific experimentation,” *HardwareX*, vol. 6, 2019. Acedido em 27/12/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00070>. [Citado nas páginas 12 e 14]
- [30] Smart Citizen, “Smart Citizen Docs.” Acedido em 28/12/2020, Disponível em: <https://docs.smartcitizen.me>. [Citado na página 13]
- [31] Cordis - European Commission, “Kunak Sensing Anywhere, an ultra-energy-efficient wireless critical system for smart environmental monitoring.” Acedido em 30/12/2020, Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/id/823487/reporting>. [Citado na página 14]
- [32] Kunak, “Smart Environment Catalogue.” Acedido em 30/12/2020, Disponível em: https://www.kunak.es/doc/External/Kunak_Smart_Environment_EN_low.pdf. [Citado nas páginas 14 e 15]
- [33] F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, and A. Borowiak, “Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring,,” *Atmosphere*, vol. 10, 2019. Acedido

- em 31/12/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>. [Citado nas páginas 15, 29 e 100]
- [34] Libelium, “Smart Cities PRO v3.0.” Acedido em 02/01/2021, Disponível em: <https://development.libelium.com/smart-cities-pro-sensor-guide/new-version-smart-cities-pro-v3-0>. [Citado nas páginas 15 e 16]
- [35] M. Dachyar, T. Y. M. Zagloel, and L. R. Saragih, “Knowledge growth and development: internet of things (IoT) research, 2006–2018,” *Helijon*, vol. 5, 2019. Acedido em 17/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2019.e0226>. [Citado na página 19]
- [36] Statista, “Internet of Things - active connections worldwide 2015-2025,” 2021. Acedido: 17/01/2021, Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>. [Citado nas páginas 19 e 20]
- [37] S. Batteries, “The impact of the communication technology protocol on your IoT application’s power consumption,” 2020. Acedido em 15/01/2021, Disponível em: <https://www.saftbatteries.com/energizing-iot/impact-communication-technology-protocol-your-iot-application%E2%80%99s-power-consumption>. [Citado na página 20]
- [38] J. Ding, M. Nemati, C. Ranaweera, and J. Choi, “IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 8, 2020. Acedido em 15/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985932>. [Citado nas páginas 20, 21, 22 e 23]
- [39] K. Hofer-Schmitz and B. Stojanović, “Towards formal verification of IoT protocols: A Review,” *Computer Networks*, vol. 174, 2020. Acedido em 13/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107233>. [Citado na página 21]
- [40] B. Foubert and N. Mitton, “Long-Range Wireless Radio Technologies: A Survey,” *Future Internet*, vol. 12, 2020. Acedido em 17/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fi12010013>. [Citado na página 22]
- [41] A. Kondoro, I. B. Dhaou, H. Tenhunen, and N. Mvungi, “Real time performance analysis of secure IoT protocols for microgrid communication,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 116, 2021. Acedido em 08/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.09.031>. [Citado nas páginas 23 e 24]

- [42] M. Mahbub, “Progressive researches on IoT security: An exhaustive analysis from the perspective of protocols, vulnerabilities, and preemptive architectures,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 168, 2020. Acedido em 08/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102761>. [Citado na página 24]
- [43] C. Patel and N. Doshi, “A Novel MQTT Security framework in Generic IoT Model,” *Procedia Computer Science*, vol. 171, 2020. Acedido em 09/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.150>. [Citado na página 24]
- [44] J. Dizdarević, F. Carpio, A. Jukan, and X. Masip-Bruin, “A Survey of Communication Protocols for Internet of Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing Integration,” *ACM Computing Surveys*, vol. 51, 2019. Acedido em 22/01/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3292674>. [Citado na página 25]
- [45] W. Y. Yi, K. M. Lo, T. Mak, K. S. Leung, Y. Leung, and M. L. Meng, “A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems,” *Sensors*, vol. 15, 2015. Acedido em 20/11/2020, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s151229859>. [Citado na página 29]
- [46] Smart Citizen, “Smart Citizen Docs - electrochemical sensors.” Acedido: 30/07/2021, Disponível em: <https://docs.smartcitizen.me/Components/sensors/air/Electrochemical%20Sensors/>. [Citado na página 29]
- [47] Alphasense, *Individual Sensor Board (ISB) - Alphasense B4 4-Electrode Gas Sensors*. Acedido: 20/04/2021, Disponível em: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/10/ISB.pdf>. [Citado na página 30]
- [48] A. Samad, D. R. Obando Nuñez, G. C. Solis Castillo, B. Laquai, and U. Vogt, “Effect of relative humidity and air temperature on the results obtained from low-cost gas sensors for ambient air quality measurements,” *Sensors*, vol. 20, 2020. Acedido em 29/03/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20185175>. [Citado na página 30]
- [49] H. Li, Y. Zhu, Y. Zhao, T. Chen, Y. Jiang, Y. Shan, Y. Liu, J. Mu, X. Yin, D. Wu, C. Zhang, S. Si, X. Wang, W. Wang, and L. Xue, “Evaluation of the Performance of Low-Cost Air Quality Sensors at a High Mountain Station with Complex Meteorological Conditions,” *Atmosphere*, vol. 11, 2020. Acedido em 29/03/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11020212>. [Citado na página 30]

- [50] Texas Instruments, *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator*, 2018. Acedido em 22/08/2021, Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1113.pdf?ts=1630082433681&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Citado na página 31]
- [51] Adafruit, *Adafruit 4-Channel ADC Breakouts*, 2021. Acedido em 22/08/2021, Disponível em: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-4-channel-adc-breakouts.pdf>. [Citado na página 32]
- [52] HopeRF, *Low Power Long Range Transceiver Module*, 2019. Acedido em 01/05/2021, Disponível em: <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>. [Citado na página 32]
- [53] The Things Network, “How Spreading Factor affects LoRaWAN device battery life.” Acedido: 01/05/2021, Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/article/how-spreading-factor-affects-lorawan-device-battery-life>. [Citado na página 33]
- [54] D. K. Sah and T. Amgoth, “Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: A Survey,” *Information Fusion*, vol. 63, 2020. Acedido em 01/05/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.07.005>. [Citado na página 33]
- [55] M. Prauzek, J. Konecny, M. Borova, K. Janosova, J. Hlavica, and P. Musilek, “Energy Harvesting Sources, Storage Devices and System Topologies for Environmental Wireless Sensor Networks: A Review,” *Information Fusion*, vol. 18, 2018. Acedido em 01/05/2021, Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2446>. [Citado na página 33]
- [56] F. Karagulian, A. Borowiak, M. Barbieri, A. Kotsev, J. Broecke, J. Vonk, J. Signorini, and M. Gerboles, “Calibration of AirSenseEUR boxes during a field study in the Netherlands,” tech. rep., Joint Research Centre, 2020. Acedido em 20/05/2021, Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344163000_Calibration_of_AirSenseEUR_boxes_during_a_field_study_in_the_Netherlands. [Citado na página 33]
- [57] LG Chem, *Product specification: Lithium Ion INR18650 F1L 3350 mAh*, 2016. Acedido em 22/05/2021, Disponível em: <https://www.botnroll.com/img/cms/ACCU-INR18650-3.35.pdf>. [Citado na página 35]

- [58] DFRobot, “Solar Power Manager: DFR0535.” Acedido: 22/05/2021, Disponível em: https://wiki.dfrobot.com/Solar_Power_Manager_SKU__DFR0535. [Citado na página 35]
- [59] S. Motahhir, A. El Hammoumi, and A. El Ghzizal, “The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 246, 2020. Acedido em 22/05/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118983>. [Citado na página 36]
- [60] Diodes Incorporated, *AP2112 - datasheet*, 2017. Acedido em 10/09/2021, Disponível em: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP2112.pdf>. [Citado na página 42]
- [61] Fairchild Semiconductor Corporation, *BSS138 - N-Channel Logic Level Enhancement Mode Field Effect Transistor*, 2005. Acedido em 13/09/2021, Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/BSS138.pdf>. [Citado na página 43]
- [62] “Correcting for background current in four electrode toxic gas sensors,” tech. rep., Alphasense, 2019. Acedido em 12/08/2021. [Citado nas páginas 51, 111 e 112]
- [63] X. Lin, “Multi-behaviors finite state machine,” *IEEE*, 2009. Acedido em 22/05/2021, Disponível em: <https://doi.org/10.1109/YCICT.2009.5382390>. [Citado na página 55]
- [64] ST, *STM32L47xxx, STM32L48xxx, STM32L49xxx and STM32L4Axxx advanced Arm-based 32-bit MCUs - Reference manual*. Acedido em 18/07/2021, Disponível no capítulo 6.2.14 em: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/DM00083560-.pdf. [Citado na página 57]
- [65] PlanTower, *PMS5003 series data manual*, 2016. Acedido: 15/03/2021, Disponível em: https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf. [Citado na página 100]
- [66] AQ-SPEC – Air Quality Sensor Performance Evaluation Center, “Purpleair PA-ii - Summary Report,” 2016. Acedido: 20/03/2021, Disponível em: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/purpleair-pa-ii---summary-report.pdf?sfvrsn=16>. [Citado na página 100]
- [67] Honeywell, *HPM Series - Particulate Matter Sensors*, 2020. Acedido: 15/03/2021, Disponível em: <https://sps.honeywell.com/us/en/products/sensing-and-iot/sensors/particulate-matter-sensors/hpm-series>. [Citado na página 100]

- [68] AQ-SPEC – Air Quality Sensor Performance Evaluation Center, “Ecowitt WH41B Sensor – Field Evaluation,” 2019. Acedido: 20/03/2021, Disponível em: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/field-evaluations/ecowitt-wh41b---field-evaluation.pdf?sfvrsn=6>. [Citado na página 100]
- [69] Alphasense, *OPC-N3 Particle Monitor - Technical Specification*. Acedido: 15/03/2021, Disponível em: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/03/OPC-N3.pdf>. [Citado na página 100]
- [70] AQ-SPEC – Air Quality Sensor Performance Evaluation Center, “Opc-n3 – Summary Report,” 2018. Acedido: 20/03/2021, Disponível em: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/alphasense-opc-n3---summary-report.pdf?sfvrsn=20>. [Citado na página 100]
- [71] Membrapor, *Carbon Monoxide Gas Sensor CO/CF-200 - Specification Sheet*. Acedido: 16/03/2021, Disponível em: <http://www.membrapor.ch/sheet/Carbon-Monoxide-Gas-Sensor-CO-CF-200.pdf>. [Citado na página 100]
- [72] Alphasense, *CO-B4 Carbon Monoxide Sensor - Technical Specification*. Acedido: 16/03/2021, Disponível em: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/CO-B4.pdf>. [Citado na página 100]
- [73] Membrapor, *Ozone Gas Sensor O3/C-5 - Specification Sheet*. Acedido: 16/03/2021, Disponível em: <http://www.membrapor.ch/sheet/Ozone-Gas-Sensor-O3-C-5.pdf>. [Citado na página 100]
- [74] Alphasense, *OX-B431 Oxidising Gas Sensor - Technical Specification*. Acedido: 16/03/2021, Disponível em: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/OX-B431.pdf>. [Citado na página 100]
- [75] Membrapor, *Nitrogen Dioxide Gas Sensor NO2/CA-2 - Specification Sheet*. Acedido: 17/03/2021, Disponível em: <https://www.membrapor.ch/sheet/Nitrogen-Dioxide-Gas-Sensor-NO2-CA-2.pdf>. [Citado na página 100]
- [76] Alphasense, *NO2-B43F Nitrogen Dioxide Sensor - Technical Specification*. Acedido: 17/03/2021, Disponível em: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-B43F.pdf>. [Citado na página 100]
- [77] Membrapor, *Nitrogen Dioxide Gas Sensor NO2/C-1 - Specification Sheet*. Acedido: 17/03/2021, Disponível em: <http://www.membrapor.ch/sheet/Nitrogen-Dioxide-Gas-Sensor-NO2-C-1.pdf>. [Citado na página 100]
- [78] Alphasense, *SO2-B4 Sulfur Dioxide Sensor - Technical Specification*. Acedido: 17/03/2021, Disponível em: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/SO2-B4.pdf>. [Citado na página 100]

Anexo A

Caracterização dos Sensores

Tabela A.1: Sensores de qualidade do ar e as suas características

Poluente	Sensor	Comunicação	Resolução	Intervalo de medição	R^2	Custo
PM_{2.5} PM₁₀	PMS 5003 [65]	UART	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM _{2.5} : 0,93 to 0,97 PM ₁₀ : 0,66 a 0,7 [66]	34 €
	Honeywell HPMA1150S0 [67]	UART	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM _{2.5} : 0,29 to 0,5 [68] PM ₁₀ : ND	25 €
CO	Alphasense OPC-N3 [69]	SPI	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.01 to 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM _{2.5} : 0,41 to 0,69 PM ₁₀ : 0,28 to 0,53 [70]	352 €
	Membrapor CO/CF-200 [71]	ADC	0.11 mg/m ³	0-229 mg/m ³	ND	83 €
O₃	Alphasense CO-B4 [72]	ADC	4,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1145,6 mg/m ³	0.875 - 0.9 [33]	130 €
	Membrapor O3/C-5 [73]	ADC	58,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-9816 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ND	103 €
NO₂	Alphasense OX-B431 [74]	ADC	29,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-39264 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.875 - 0.9 [33]	130 €
	Membrapor NO2/CA-2 [75]	ADC	37.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-3763.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ND	110 €
SO₂	Alphasense NO2-B43F [76]	ADC	28.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-37633 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.875 - 0.9 [33]	130 €
	Membrapor SO2-C1 [77]	ADC	52,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0 - 2420 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ND	125 €
	Alphasense SO2-B4 [78]	ADC	13,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-262000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ND	130 €

Anexo B

Consumo energético previsto nos diferentes modos de operação

Tabela B.1: Consumo previsto de cada um dos componentes do sistema. Cinzento - Inativo; Verde - Ativo; Salmão - *Deep Sleep*

Sensor / <i>Board</i>	Quantidade	Consumo (mA)				Total (mAh)
		Modo Adormecido 55 min	<i>keepalive</i> 1 min	Receção de configurações 1 min	Aquisição e transmissão 3 min	
PM	2	0	0	0	80	8,09
AM2315 (Temperatura Humidade)	1	0	0	0	0,5	0,03
BME680 (Pressão Atmosférica)	1	0	0,0027	0,0027	0,0027	0,001
STM32 (Microcontrolador)	1	5	100	100	100	13,05
ISB (Alphasense <i>Board</i>)	4	1,5	1,5	1,5	1,5	6,07
Sensor Alphasense (CO, O3, NO2, SO2)	4	8,5	8,5	8,5	8,5	34,38
Módulo LoRa	1	0	50	50	50	4,21
Estação Meteorológica	1	0	0	0	30	1,52
Total	44	45	190	190	380,5	67,33

Anexo C

Esquemáticos - Estação de Monitorização

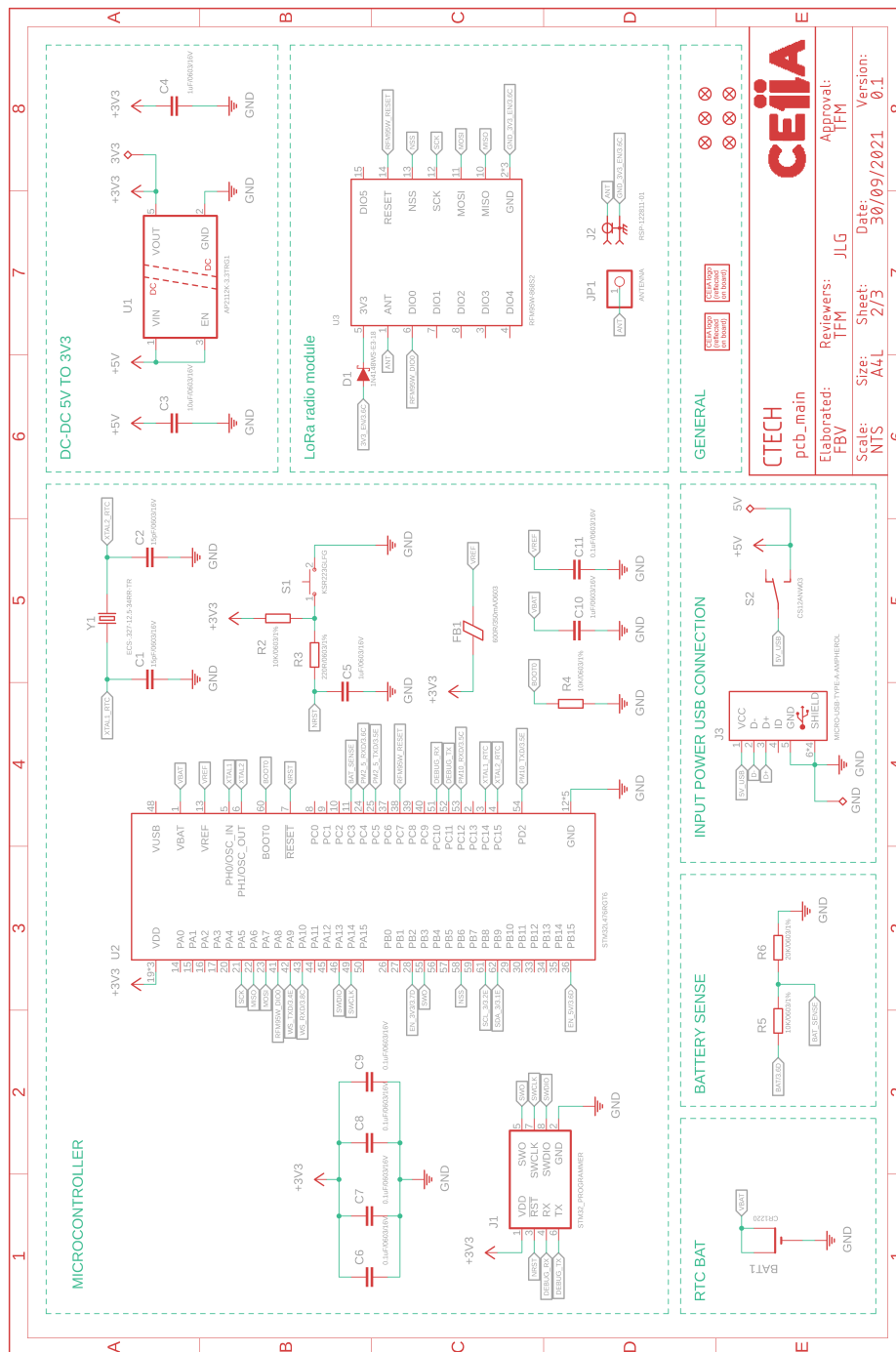


Figura C.1: Esquemático da *board* principal - microcontrolador e respetivo *hardware*, módulo de rádio LoRa, divisor de tensão da bateria e entrada fixa de tensão a partir do conetor micro-USB

CEIA

CTECH
 Elaborated: pcb_main
 FBV
 Reviewers: JLG
 TFM
 Approval: TFM

Size: A4L
 Sheet: 2/3
 Date: 30/09/2021
 Version: 0.1

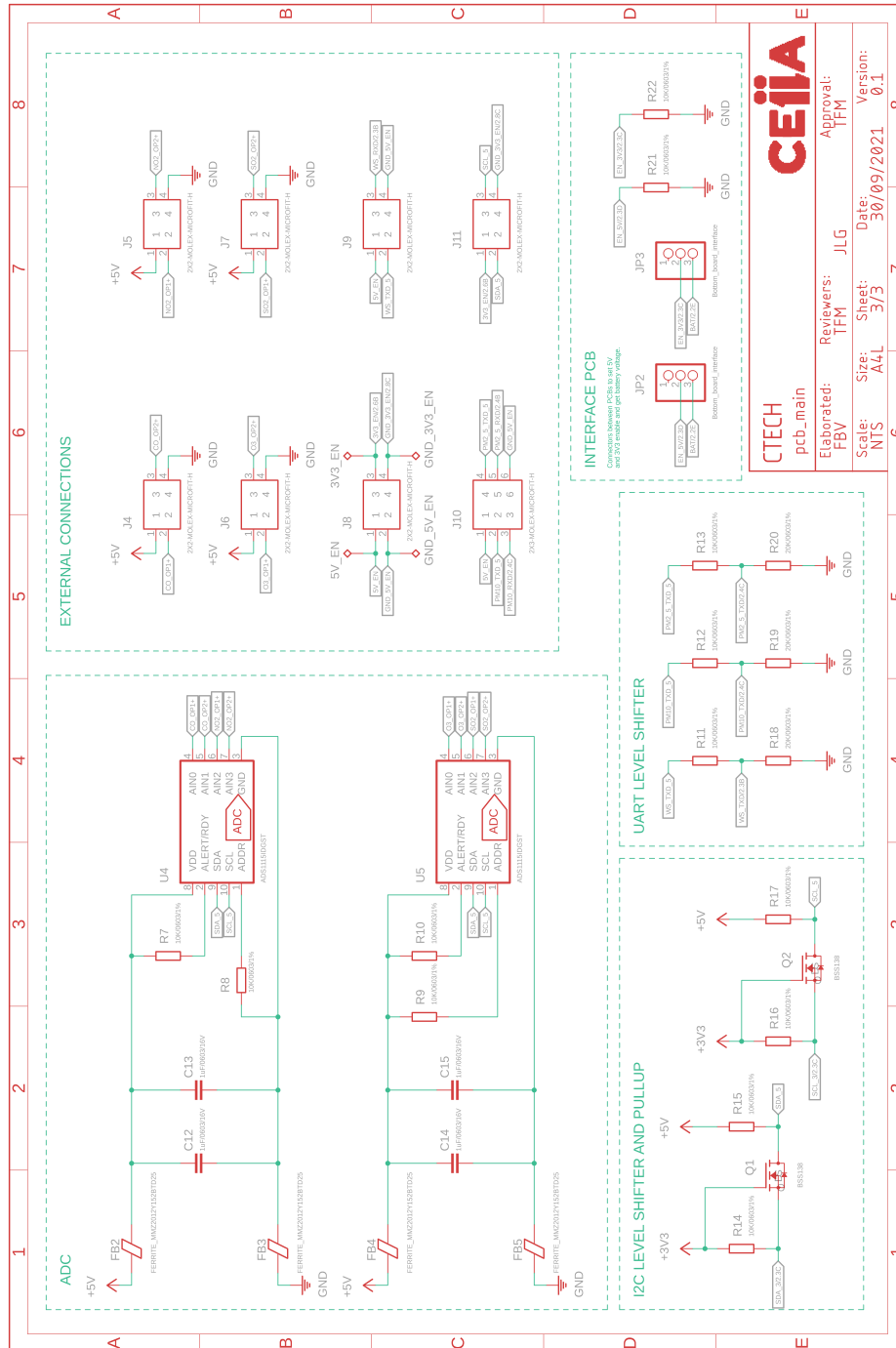


Figura C.2: Esquemático da *board* principal - ADC's, *level shifters* e conectores

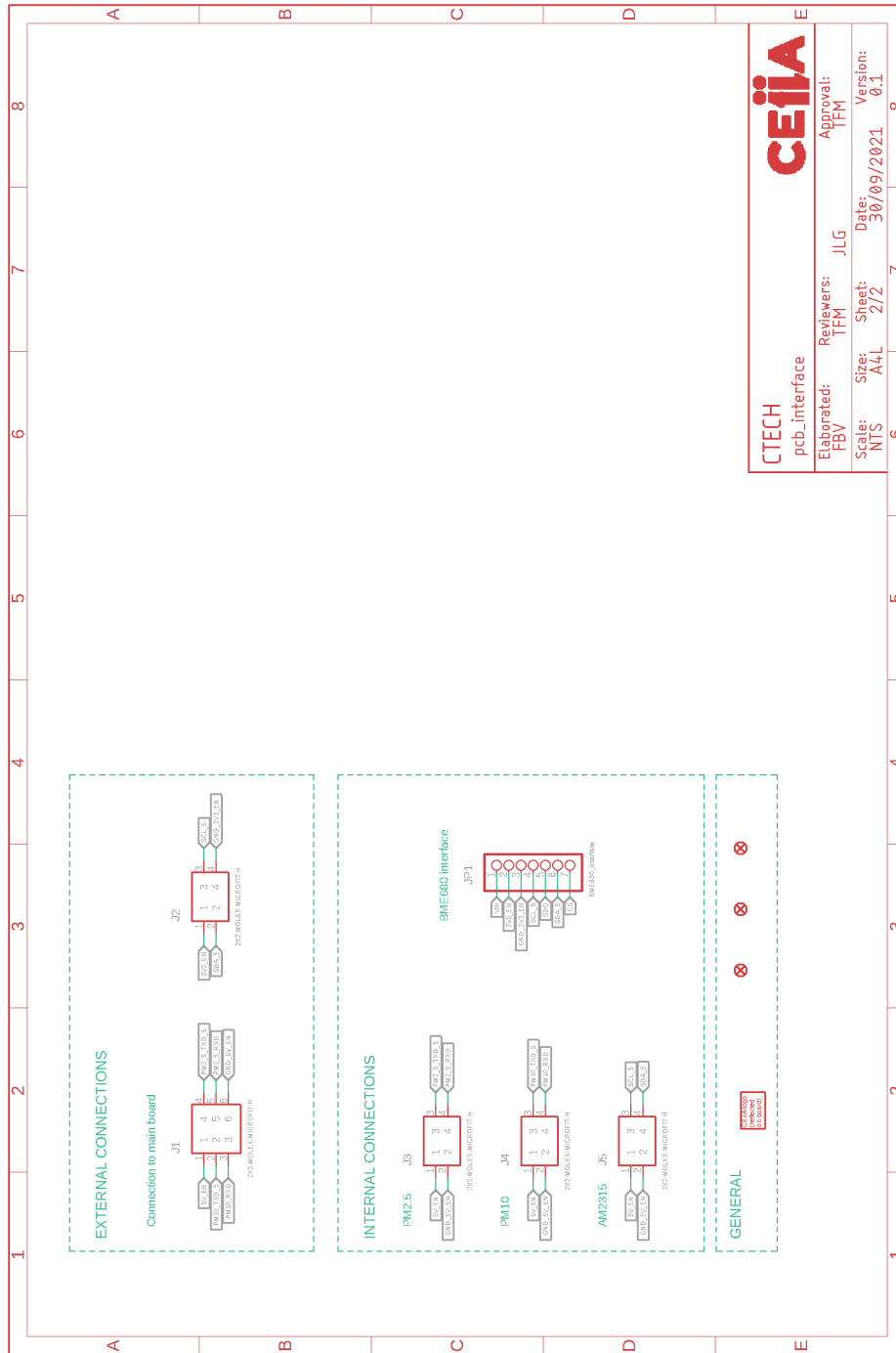


Figura C.3: Esquemático da *board* de interface

Anexo D

Tabelas de Estados - Estação de Monitorização

Tabela D.1: Descrição do estado de *power off* - Máquina de estado

Estado: POWER OFF		
Transição		Estado Seguinte
<i>trigger</i> RTC		CHECK MEMORY
Ações de entrada	Ações de estado	Ações de saída
- Alimentação dos periféricos desligada		- Microcontrolador ligado

Tabela D.2: Descrição do estado de *check memory* - Máquina de estados

Estado: CHECK MEMORY		
Transição		Estado Seguinte
<i>keepalive</i>		TRANSMISSÃO
hora para aquisição de dados		AQUISIÇÃO DE DADOS
início 2 min		POWER OFF
Ações de entrada	Ações de estado	Ações de saída
<ul style="list-style-type: none"> - Ler dados da EEPROM - Habilitar a alimentação dos periféricos - Instanciar todos os periféricos - Calcular a hora da transição para o próximo estado 	<ul style="list-style-type: none"> - Comparar a hora atual com a hora para transitar de estado 	<ul style="list-style-type: none"> - Definir a hora de acordar no caso do próximo estado ser <i>Power Off</i>

Tabela D.3: Descrição do estado de aquisição de dados - máquina de estados

Estado: AQUISIÇÃO DE DADOS		
Transição		Estado Seguinte
aquisição completa		TRANSMISSÃO
bateria fraca detetada		TRANSMISSÃO
Ações de entrada	Ações de estado	Ações de saída
<ul style="list-style-type: none"> - Habilitar a alimentação de todos os periféricos - Inicialização dos contadores 	<ul style="list-style-type: none"> - Adquirir dados de todos os sensores com médias móveis e reportar erros no caso da aquisição falhar - Adquirir dados a uma frequência de 1 HZ durante o período definido 	<ul style="list-style-type: none"> - Desabilitar a saída de 5V

Tabela D.4: Descrição do estado de transmissão - máquina de estados

Estado: TRANSMISSÃO		
Transição		Estado Seguinte
trama enviada		RECEÇÃO DE DADOS
Ações de entrada	Ações de estado	Ações de saída
<ul style="list-style-type: none"> - Obtém o estado anterior 	<ul style="list-style-type: none"> - Construir a mensagem conforme a transição que originou o estado 	

Tabela D.5: Descrição do estado de receção de dados - máquina de estados

Estado: RECEÇÃO DE DADOS		
Transição		Estado Seguinte
<i>gateway</i> não enviou qualquer resposta		POWER OFF
<i>gateway</i> enviou resposta & as propriedades do sistema foram atualizadas		POWER OFF
Ações de entrada	Ações de estado	Ações de saída
- Inicialização dos contadores Módulo LoRa em modo receção	- Aguardar a receção de uma trama de dados por parte do <i>gateway</i> durante o período definido - Fazer o <i>parsing</i> dos dados se a mensagem chegar e escrever as configurações na EEPROM	- Definir a hora de acordar

Anexo E

Parâmetros dos Sensores Eletroquímicos

Tabela E.1: Algoritmos sugeridos pelo fabricante dependendo do sensor [62]

Sensor	Algoritmo sugerido	Algoritmo alternativo
CO-B4	5.1	5.2
NO2-B43F	5.1	5.3
OX-B431	5.1	5.3
SO2-B4	5.4	5.1/5.2

Tabela E.2: Fatores de compensação de temperatura dos sensores utilizados [62]

Sensor	Algoritmo	Fator	Temperatura (°C)								
			-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
CO-B4	5.1	n_T	0.7	0.7	0.7	0.7	1	3	3.5	4	4.5
	5.2	k_T	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	1	1.2	1.3	1.5
	5.3	k'_T	-1	0.6	0	0	0	1	1	1	1
	5.4	k''_T	55	55	55	50	31	0	-50	-150	-250
NO2-B43F	5.1	n_T	1.3	1.3	1.3	1.3	1	0.6	0.4	0.2	-1.5
	5.2	k_T	2.2	2.2	2.2	2.2	1.7	1	0.7	0.3	-2.5
	5.3	k'_T	1	1	1	1	1	1	0.4	-0.1	-4
	5.4	k''_T	7	7	7	7	4	0	0.5	5	67
OX-B431	5.1	n_T	0.9	0.9	1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.7
	5.2	k_T	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1.2	1.5	2.2
	5.3	k'_T	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	1	2.8	5	5.3
	5.4	k''_T	1	1	1	1	1	1	8.5	23	103
SO2-B4	5.1	n_T	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	3	5.8
	5.2	k_T	1	1	1	1	1	1	1.2	1.9	3.6
	5.3	k'_T	1	1	1	1	1	1	2	3.5	7
	5.4	k''_T	-4	-4	-4	-4	-4	0	20	140	450