



Módulos Internet of Things (IoT) plug and play (PnP) para contexto de agricultura e floresta de precisão

ALEXANDRE MAGNO FONTAINHA CARVALHO

setembro de 2024

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Módulos *Internet of Things* (IoT)
plug and play (PnP) para contexto de
agricultura e floresta de precisão

Alexandre Magno Fontainha Carvalho

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Setembro, 2024

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 e Planeamento Industrial.

Candidato: Alexandre Magno Fontainha Carvalho, N.º 1161751,
1161751@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Manuel Silva, mss@isep.ipp.pt

Empresa: INESC TEC

Orientador: Pedro Moura, pedro.h.moura@inesctec.pt



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

Setembro, 2024

Agradecimentos

Os meus agradecimentos vão para todos aqueles que, de diferentes modos, me apoiaram na realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Manuel Silva por ter aceite ser meu orientador científico, pelo seu saber, contributo e opinião assertiva.

Em especial, ao Pedro Moura por ter aceite ser meu orientador, pelo seu saber, disponibilidade, encorajamento, preocupação e ajuda na realização desta dissertação. Pela amizade e por sempre ter acreditado em mim. O meu mais sincero obrigado.

A todo o laboratório TRIBE por sempre acreditarem em mim, pela ajuda, pelo apoio e pelo espírito de equipa único.

A todas os professores e colegas que partilharam o seu conhecimento ao longo destes anos que, de alguma forma, me ajudaram a chegar até aqui, contribuindo de forma essencial para a minha formação, tanto a nível académico, como a nível pessoal.

Aos meus pais e irmã, pelo apoio e a força que me deram para realizar esta dissertação. Por todas as oportunidades proporcionadas e janelas abertas que me fazem ser quem sou hoje e estar onde estou.

Por fim, à minha namorada, pela paciência e pelo apoio incondicional, por toda a ajuda na realização desta dissertação.

Alexandre Carvalho

Resumo

A aplicação de sistemas inteligentes baseados na *Internet of Things* tem-se tornado essencial na agricultura moderna, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, como a água e o solo, e um controlo rigoroso de variáveis ambientais, tais como a temperatura e a humidade. Estes sistemas facilitam a implementação de práticas agrícolas de precisão, que resultam numa maior produtividade e sustentabilidade. No entanto, o sucesso da *Internet of Things* na agricultura depende fortemente da escolha dos protocolos de comunicação adequados, especialmente em campos de grande extensão, onde a implementação de soluções cabladas seria dispendiosa e impraticável, além de interferir com a operação de máquinas agrícolas.

Neste contexto, as tecnologias *Low Power Wide-Area* surgem como uma solução promissora, permitindo a comunicação a longas distâncias com baixo consumo energético, um fator crucial em ambientes agrícolas, onde a eficiência energética dos dispositivos é uma prioridade. Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um dispositivo *plug and play* que, integrado numa rede IoT escalável, seja capaz de adquirir e transmitir dados em quase tempo real para um servidor. Foram analisados e comparados diferentes protocolos de comunicação *wireless*, com especial foco na otimização da recolha de dados, na transmissão de informação e eficiência energética. A solução proposta visa garantir altos níveis de autonomia energética e uma operação contínua, respondendo às necessidades específicas do setor agrícola.

Devido a esta necessidade, foi desenvolvido um dispositivo de *hardware*. Foram feitas as devidas implementações de *software* e feitos os seus respetivos testes: aquisição e processamento de dados, testes ao circuito de radiofrequência, testes de alcance e testes de eficiência energética, onde foram atingidos quase todos os objetivos propostos e idealizados.

Palavras-Chave: IoT, Agricultura de Precisão, Redes *Wireless*, Dispositivos *Plug and Play*, Baixo Custo, Baixo Consumo, *Low-Power Wide-Area Network*

Abstract

The application of intelligent systems based on the Internet of Things has become essential in modern agriculture, enabling more efficient management of natural resources such as water and soil, as well as strict control of environmental variables such as temperature and humidity. These systems facilitate the implementation of precision agriculture practices, resulting in increased productivity and sustainability. However, the success of Internet of Things in agriculture heavily depends on the choice of suitable communication protocols, especially in large fields, where the implementation of wired solutions would be costly and impractical, in addition to interfering with the operation of agricultural machinery.

In this context, Low Power Wide-Area technologies emerge as a promising solution, allowing long-distance communication with low energy consumption, a crucial factor in agricultural environments where device autonomy is a priority. The main objective of this work is to develop a plug-and-play device that, integrated into a scalable IoT network, is capable of acquiring and transmitting data in near real-time to a server. Different wireless communication protocols were analyzed and compared, with a particular focus on optimizing the triad: data collection, information transmission, and energy efficiency. The proposed solution aims to ensure high levels of energy autonomy and continuous operation, addressing the specific needs of the agricultural sector.

Due to this need, a hardware device was developed. The necessary software implementations were carried out and respective tests were conducted: data acquisition and processing, radiofrequency circuit testing, range testing, and energy efficiency testing, where nearly all the proposed and envisioned objectives were achieved.

Keywords: IoT, Precision Agriculture, Wireless Networks, Plug and Play Devices, Cost-Effective, Low-Power, Low-Power Wide-Area Network

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Organização da Dissertação	3
1.5 Plano de Trabalho	3
2 Enquadramento Teórico	5
2.1 Redes IoT	5
2.1.1 Topologia	6
2.1.2 Protocolos de Comunicação	11
2.2 Módulos IoT	17
2.2.1 Módulos de Comunicação	17
2.2.2 Microcontroladores	18
2.2.3 Módulos Integrados	19
2.3 Sensorização	21
2.3.1 Sensores de Temperatura e Humidade do Ar	21
2.3.2 Sensor de Radiação	23
2.3.3 Pluviómetro	24
2.3.4 Sensores de Temperatura e Humidade do Solo	24
2.4 Alimentação Elétrica	26
2.4.1 Pilhas	26
2.4.2 Baterias	27
2.4.3 Painéis Solares Fotovoltaicos	28
2.4.4 Sistema de Alimentação Híbrido	29
3 Estado da Arte	31
3.1 LoRaWAN em Implementações Agrícolas	31

3.2	Sigfox e NB-IoT no Setor Agrícola	32
3.3	Eficiência Energética e Desafios Tecnológicos	32
4	Implementação de <i>Hardware</i>	35
4.1	Introdução	35
4.2	Análise de Requisitos de <i>Hardware</i>	36
4.2.1	Requisitos Funcionais	36
4.2.2	Requisitos de Desempenho	37
4.2.3	Recomendações e Cuidados	37
4.3	Diagrama de Arquitetura de <i>Hardware</i>	38
4.4	Implementação de <i>Hardware</i>	38
4.4.1	Microcontrolador	39
4.4.2	Circuito de Radiofrequência	40
4.4.3	Interface de Comunicação com Sensores Externos	42
	Portos ADC	42
	Portos I2C	43
	Porto UART	45
	<i>Level Shifter</i>	46
4.4.4	STSAFE-A110	47
4.4.5	EEPROM	48
4.4.6	Memória <i>Flash</i>	49
4.4.7	Conetor de Programação	50
4.4.8	Botões	50
4.4.9	Circuito de Alimentação	51
4.5	Prototipagem	52
4.6	Soldadura	56
4.7	Testes e Validação	58
4.7.1	Validação do Circuito de Radiofrequência Através do Exemplo “ <i>Ping Pong</i> ”	59
5	Implementação de <i>Software</i>	61
5.1	Arquitetura do Sistema	61
5.1.1	<i>Sensor Node</i>	63
5.1.2	<i>Gateway</i>	70
6	Discussão	75
6.1	Testes e Resultados	75
6.2	Principais Dificuldades	84
7	Conclusões	85
7.1	Trabalho Futuro	86

Lista de Figuras

2.1	Topologia ponto a ponto	6
2.2	Topologia malha (completa)	7
2.3	Topologia estrela	7
2.4	Topologia barramento	8
2.5	Topologia anel	9
2.6	Topologia árvore	9
2.7	Topologia híbrida	10
2.8	Módulo LoRa 433MHz SX1278 / RA-02	18
2.9	RP2040	18
2.10	Qualcomm Snapdragon 8cx Gen 3	20
2.11	STM32WL	20
2.12	Raspberry Pi Compute Module 4	21
2.13	piranómetro	23
2.14	Sensor capacitivo de humidade do solo	25
4.1	Diagrama de alto nível da arquitetura do sistema	38
4.2	Microcontrolador STM32WL5MOCHTR com as respetivas ligações efetuadas	40
4.3	Circuito elétrico do bloco da antena	41
4.4	Circuito elétrico dos <i>switches</i>	42
4.5	Esquema elétrico dos portos ADC	43
4.6	Esquema elétrico do porto I2C2	44
4.7	Esquema elétrico do porto I2C3 a 3,3 V	44
4.8	Esquema elétrico do porto I2C3 a 5 V	44
4.9	Esquema elétrico dos <i>pull-ups</i> dos barramentos I2C	45
4.10	Esquema elétrico do porto UART	46
4.11	Esquema elétrico do <i>level shifter</i>	47
4.12	Esquema elétrico do STSAFE-A110 e correspondente circuito de alimentação	48
4.13	Esquema elétrico do circuito da EEPROM	49
4.14	Circuito elétrico da memória <i>flash</i>	49
4.15	Esquema elétrico do conector para programação	50
4.16	Esquema elétrico dos botões <i>user</i> e <i>reset</i>	51

4.17	Esquema elétrico do circuito de alimentação	52
4.18	<i>Copper region</i> correspondente ao plano de massa	53
4.19	As quatro <i>layers</i> da TL.SENSE	54
4.20	Visualização 3D da TL.SENSE	55
4.21	Fotografias da PCB TL.SENSE, fabricada pela JLCPCB	55
4.22	Diferença do processo de soldadura entre componentes <i>through hole</i> e SMD	56
4.23	Localização dos pinos no microcontrolador	56
4.24	TL.SENSE com os componentes mínimos soldados	57
4.25	Primeiro teste de validação.	58
4.26	Fotografia de duas TL.SENSE	59
4.27	Troca de mensagens entre os dois nós a executarem o exemplo “ <i>Ping Pong</i> ”.	60
5.1	Sistema de ID implementado	62
5.2	Codificação para cada tipo de sensor	63
5.3	Codificação para cada pedido de dados	63
5.4	Fluxograma completo da arquitetura de sistema idealizada para um <i>Sensor Node</i>	64
5.5	Parte A do fluxograma correspondente ao pedido de atribuição de ID por parte do <i>sensor node</i>	65
5.6	Parte B do fluxograma correspondente à atribuição do ID do <i>sensor node</i>	67
5.7	Parte C do fluxograma correspondente ao envio dos dados do <i>sensor node</i> para a <i>gateway</i>	68
5.8	Diagrama de sequência de atribuição de ID	69
5.9	Diagrama de sequência de pedido de dados do sensor	69
5.10	Fluxograma completo da arquitetura de sistema idealizada para a <i>gateway</i>	70
5.11	Parte A do fluxograma correspondente à receção de mensagem e verificação de ID por parte da <i>gateway</i>	71
5.12	Parte B do fluxograma correspondente à atribuição de ID por parte da <i>gateway</i>	72
5.13	Parte C do fluxograma correspondente ao processamento da mensagem recebida	73
6.1	Power Profiler Kit II	76
6.2	Consumo elétrico da TL.SENSE sem nenhum <i>firmware</i> nem sensores externos conectados	76
6.3	Teste de distância no exemplo “ <i>Ping Pong</i> ”. <i>Campus</i> da FEUP	77
6.4	Terminal série com as mensagens relativas ao <i>sensor node</i>	78

6.5	Terminal série com as mensagens relativas à <i>gateway</i>	79
6.6	Transmissão <i>Low-Power</i> , 14 dBm com um SF7	79
6.7	Transmissão <i>High-Power</i> , 22 dBm com um SF7	80
6.8	Transmissão <i>Low-Power</i> , 14 dBm com um SF12	80
6.9	Transmissão <i>High-Power</i> , 22 dBm com um SF12	81
6.10	Abertura de 2ª janela de recepção após não recepção de ACK	82
6.11	Envio de mensagens por parte do <i>sensor node</i> a cada 70 segundos	83
6.12	Gráfico de consumo da <i>gateway</i>	84

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa entre as diferentes topologias	10
2.2	Tabela comparativa entre os diferentes protocolos	16
4.1	Tabela comparativa entre módulos LoRa	39
4.2	Tabela comparativa entre SoC LoRa	39
4.3	Consumos dos circuitos integrados presentes na TL.SENSE	51
4.4	Consumos do microcontrolador nos diferentes modos de operação	52

Lista de Acrónimos

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ACK	<i>Acknowledge</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ATT	<i>Attribute Protocol</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
GATT	<i>Generic Attribute Profile</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GND	<i>Ground</i>
GPIO	<i>General Purpose Input / Output</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HDMI	<i>High-Definition Multimedia Interface</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LoRa	<i>Long-Range</i>
LoRaWAN	<i>Long-Range Wide Area Network</i>

LPWAN	<i>Low-Power Wide-Area Network</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band IoT</i>
P2P	<i>Peer-To-Peer</i>
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PnP	<i>Plug and Play</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SMD	<i>Surface-Mount Devices</i>
SoC	<i>System-on-Chips</i>
SoM	<i>System-on-Modules</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TL.SENSE	<i>Tribe Lab Sensor Extension Network for Smart Environment</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver / Transmitter</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos anos, a agricultura tem enfrentado desafios crescentes relacionados com a necessidade de melhorar a eficiência na utilização de recursos naturais, como a água e a energia, bem como de aumentar a produtividade de forma sustentável. A transformação digital do setor, impulsionada por inovações tecnológicas, tem sido apontada como uma solução crucial para responder a estas exigências.

1.1 Contexto

Nesse cenário, a *Internet of Things* (IoT) tem ganho destaque pela sua capacidade de monitorizar, em tempo real, diversos parâmetros ambientais e de operação no terreno agrícola, permitindo uma tomada de decisão mais informada e precisa. A aplicação de dispositivos IoT em áreas agrícolas pode promover um uso mais racional dos recursos, potenciando a sustentabilidade e reduzindo os custos operacionais.

No entanto, para que a IoT seja eficaz neste setor, é fundamental que os dispositivos desenvolvidos sejam capazes de operar em ambientes muitas vezes remotos e com acesso limitado a fontes de energia e conectividade. As tecnologias *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN) surgem como uma solução promissora, devido à sua capacidade de suportar a comunicação de longa distância com baixo consumo energético. A integração de dispositivos IoT baseados em tecnologias LPWAN permite a monitorização contínua e de baixo custo, essencial para a agricultura de precisão, onde a recolha e transmissão de dados em tempo real são indispensáveis para otimizar as práticas agrícolas e, simultaneamente, assegurar a preservação ambiental.

1.2 Motivação

A crescente pressão para aumentar a eficiência agrícola, aliada à escassez de recursos naturais e às exigências de sustentabilidade, constitui uma forte motivação para a implementação de soluções tecnológicas inovadoras. No setor agrícola, a monitorização de variáveis como a humidade do solo, a qualidade do ar, ou a saúde das plantas são determinantes para a tomada de decisões. Estas tarefas podem ser facilitadas através de sistemas IoT, que permitem a recolha automática e em tempo real de dados relevantes. Ao longo do tempo, este tipo de solução pode traduzir-se numa melhoria significativa da produtividade e da sustentabilidade das operações agrícolas. Assim, a necessidade de dispositivos que possam operar de forma eficiente e autónoma em terrenos agrícolas constitui um dos principais incentivos para o desenvolvimento de soluções de IoT com capacidades de comunicação LPWAN.

Além disso, a otimização energética é um fator crucial na conceção de dispositivos IoT para ambientes agrícolas, onde o acesso a fontes de energia é, frequentemente, limitado. A motivação para o presente trabalho prende-se com o desenvolvimento de uma solução que, para além de garantir a recolha e transmissão de dados em quase tempo real, seja capaz de operar com uma elevada autonomia energética. O objetivo de otimizar a gestão energética, sem comprometer a eficiência na recolha e transmissão de dados, é um desafio tecnológico de grande relevância, particularmente num setor tão dependente de condições ambientais imprevisíveis como é o agrícola.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver um dispositivo *Plug and Play* (PnP) integrado numa rede IoT escalável, considerando tecnologias e protocolos de comunicação LPWAN. Estes dispositivos devem ser capazes de adquirir e publicar, em servidor, dados em quase Tempo-Real e de forma continuada. Devem, também, ser idealizadas, desenvolvidas e implementadas as arquiteturas de sistema, tanto para os dispositivos, como para as *gateways*, dispositivos que irão fazer a ligação com o servidor.

A solução apresentada deverá ter altos níveis de autonomia energética, tendo como segundo objetivo otimizar o trinómio: recolha de dados, transmissão de informação e uma gestão energética eficiente.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 2 - Enquadramento Teórico: são abordados os conceitos teóricos fundamentais para a compreensão do tema em estudo, fornecendo a base para o desenvolvimento das próximas fases do trabalho.
- Capítulo 3 - Estado da Arte: é feita uma análise crítica da literatura existente, explorando as abordagens, soluções e tecnologias relacionadas com o tema.
- Capítulo 4 - Implementação de *hardware*: é descrito em detalhe o processo de desenvolvimento da componente de *hardware*, incluindo as ferramentas, técnicas e metodologias aplicadas, bem como os desafios encontrados.
- Capítulo 5 - Implementação de *software*: foca-se no desenvolvimento da componente de *software*, em particular, na idealização e implementação das arquiteturas de sistema.
- Capítulo 6 - Discussão: são apresentados os testes feitos e respetivos resultados, acompanhado de uma discussão sobre os mesmos.
- Capítulo 7 - Conclusões: apresenta as considerações finais sobre o trabalho desenvolvido e sobre o que precisa ser melhorado.

1.5 Plano de Trabalho

O plano de trabalho idealizado para esta dissertação é o seguinte:

- Iniciar por uma pesquisa relativamente ao estado da arte e analisar soluções já existentes aplicadas em contexto real.
- Fazer uma pesquisa teórica sobre todos os componentes de *hardware* que possam vir a integrar a solução desenvolvida.
- Projetar, dimensionar e desenhar uma solução de *hardware* que cumpra os requisitos e objetivos desta dissertação.
- Fabricar, soldar e testar a solução, seguido da sua validação e testes.
- Desenvolver a arquitetura de sistema e sua implementação.
- Realizar todos os testes e validações.
- Em paralelo escrever o documento da dissertação.

Capítulo 2

Enquadramento Teórico

Cada vez mais a sustentabilidade da nossa sociedade está dependente de uma agricultura e floresta de precisão, sendo crucial um alto nível de eficiência na produtividade e um baixo nível de desperdício dos recursos naturais, cada vez mais escassos, e artificiais. Porém, o desenvolvimento de soluções de sensorização modulares, robustas e com um custo-benefício adequado, é um desafio.

2.1 Redes IoT

Redes IoT referem-se à interligação entre dispositivos de sensorização e atuação com a *internet*. A partir dos mesmos são desencadeados fluxos de informação que podem potenciar a automação de processos, monitorização em tempo real e tomada de decisões informadas com base nos dados recolhidos, contribuindo para a eficiência, otimização de recursos e o desenvolvimento de aplicações inovadoras em diversas áreas, como saúde, agricultura, transporte e cidades inteligentes.

Nesta secção é apresentada a base de uma rede IoT, ou seja, a forma como a informação flui de um sensor até uma *gateway* (dispositivo central inteligente, responsável por criar um ponto de ligação e transferência de dados entre a rede IoT e a nuvem), explicando as diversas topologias e protocolos de comunicação *wireless* existentes.

2.1.1 Topologia

A forma como vários nós e/ou dispositivos estão física ou logicamente ligados entre si dentro de uma rede, de forma a se relacionarem entre eles, denomina-se de topologia da rede. Existem múltiplas formas de organizar uma rede, todas elas com as suas próprias vantagens e desvantagens, mediante as aplicações consideradas e os requisitos pré-definidos, porém, todas elas determinantes e essenciais para o bom desempenho da rede.

Ponto a Ponto

A topologia Ponto a Ponto [1], Figura 2.1, também conhecida como *Peer-To-Peer* (P2P), é a topologia de menor complexidade, uma vez que baseia o seu funcionamento na lógica "emissor-recetor", onde os dois nós estão unicamente ligados entre si e apenas comunicam um com o outro. Esta topologia apresenta segurança e fiabilidade, uma vez que a comunicação é feita diretamente entre dois dispositivos e não existem dispositivos intermédios que possam comprometer a ligação. Porém, a manutenção de redes P2P pode ser um desafio, uma vez que a gestão de cada dispositivo tem de ser feita individualmente e desligados da rede. Existe, também, uma falha na redundância da rede. Caso um dos dispositivos falhe ou desligue, o outro fica sem comunicação.

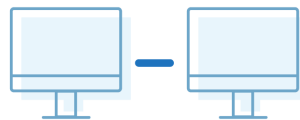


Figura 2.1: Topologia ponto a ponto

Malha

A topologia em malha [1], *Mesh*, por sua vez, considera a existência de múltiplas ligações em cada um dos nós. Na figura 2.2, é ilustrada uma Malha Completa, na qual cada nó está ligado a todos os outros, potenciando uma comunicação direta ou indireta entre os mesmos. Podemos ainda considerar uma Malha Parcial, onde cada nó está ligado a quase todos os outros, ou quando vários nós estão ligados a todos os outros e outros só estão ligados a alguns.

A implementação de uma topologia em Malha aumenta a robustez da rede, porém aumenta também os custos de implementação e de manutenção.

A comunicação entre nós, nesta topologia, é bastante rápida, robusta, segura, privada e a deteção de falhas é realizada facilmente. Caso uma ligação falhe, existem

diversos caminhos alternativos para os dados chegarem ao nó de destino. Dada a sua configuração, é possível ter distâncias grandes entre os nós mais afastados.

Este tipo de topologia é altamente utilizado em sistemas de comunicação militar, principalmente devido a sua redundância e à sua capacidade de reencaminhamento da informação caso um dos nós fique *offline*.

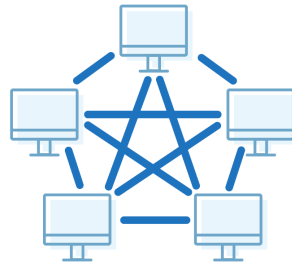


Figura 2.2: Topologia malha (completa)

Estrela

Na topologia em Estrela [1], Figura 2.3, existe um *hub* central e todos os dispositivos estão ligados a esse mesmo *hub*. Não existe comunicação entre dispositivos. É uma configuração robusta e se uma ligação falhar, apenas esse dispositivo fica desconectado, mantendo-se o restante sistema em funcionamento. Porém, se o *hub* central avariar, todo o sistema fica desconectado. Caso exista uma falha em alguma ligação, a sua deteção é fácil. Adicionalmente, a capacidade de processamento da informação a circular fica limitada pela capacidade do dispositivo central.

Um exemplo facilmente observável da topologia em Estrela é a rede Wi-Fi, á qual os telemóveis, *tablets*, computadores se ligam, onde o dispositivo central é o ponto de acesso *wireless*. Porém, é necessário ter em conta que existem também aplicações em Malha Completa Wi-Fi.



Figura 2.3: Topologia estrela

Barramento

A topologia em Barramento [1], Figura 2.4, tipicamente referido como *Bus*, consiste na ligação de todos os dispositivos a uma única linha principal, denominada de *backbone*. É nessa linha que os dados são transmitidos e compartilhados entre os diferentes dispositivos. Uma desvantagem desta configuração é a robustez. Caso o *backbone* falhe, existe a possibilidade de toda a rede ficar em comunicações. Porém, em certos casos os dispositivos que estão ligados antes da falha, podem manter comunicação, podendo esta apresentar falhas.

Uma possibilidade que esta topologia apresenta é o uso de cabos de par trançado, de forma a cancelar ou reduzir o mais possível as interferências eletromagnéticas e as perdas devido às distâncias. O custo para a sua implementação, em relação a outras tipologias, é mais baixo.

Caso haja um grande tráfego de dados na rede, a probabilidade de colisões e perda de dados é alta, dessa forma é necessária a implementação de uma camada ou serviço de gestão de tráfego de dados. A adição de novos dispositivos na rede irá impor uma diminuição na velocidade de transmissão dos dados e a criação de novos ID's atribuídos aos dispositivos, havendo assim um limite para o número de dispositivos presentes num barramento.

Dois protocolos de comunicação que utilizam esta topologia são o *Controller Area Network (CAN)* e o *Inter-Integrated Circuit (I2C)*.

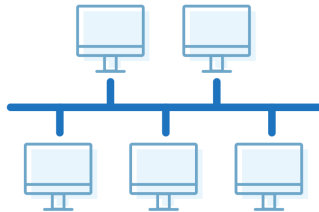


Figura 2.4: Topologia barramento

Anel

Nesta topologia, em anel [1], os dispositivos estão ligados num *loop* fechado, como é possível observar na Figura 2.5. A transmissão da informação entre dispositivos é realizada apenas num único sentido, podendo ser declarada como uma topologia unidirecional. Pode ser afirmado, ainda, que a topologia em anel são múltiplas topologias ponto a ponto.

Existem porém, as topologias de anel duplo, onde cada dispositivo possui duas ligações ativas, cada uma para cada sentido de fluxo de dados.

Desta forma, a probabilidade de colisão entre informação é mínima. Não apresenta grandes dificuldades nos processos de instalação e expansão. Por outro lado, caso um nó falhe, existe uma quebra no ciclo e a recepção da informação por certos dispositivos fica comprometida, podendo mesmo todos os dispositivos ficarem sem comunicações.

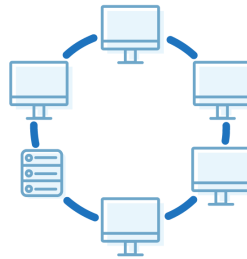


Figura 2.5: Topologia anel

Árvore

A topologia em Árvore [1], Figura 2.6, é uma variação da topologia em Estrela. Aqui existe um conceito de hierarquia, onde existe um dispositivo central, vários dispositivos secundários e por fim, os dispositivos finais. É uma topologia com custos altos de implementação e de manutenção. Porém permite, quando necessário, o isolamento total de uma secção da rede, sem comprometer o normal funcionamento das restantes.

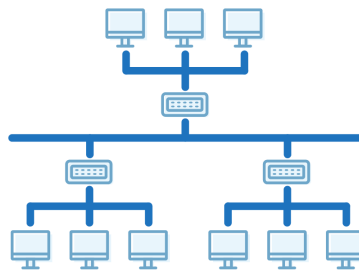


Figura 2.6: Topologia árvore

Híbrida

Por fim, a topologia Híbrida [1], tal como o nome indica e é possível constatar na Figura 2.7, é a combinação de duas ou mais topologias. Normalmente apresentam uma flexibilidade excecional pois permitem diversas configurações e número de dispositivos. Porém, idealizar e implementar uma rede híbrida é um desafio de custo-benefício, uma vez que arrecada com todas as dificuldades, bem como todas as vantagens das tipologias a implementar. Além das dificuldades, o custo também é

uma questão problemática, uma vez que é necessário implementar cada uma dessas topologias.

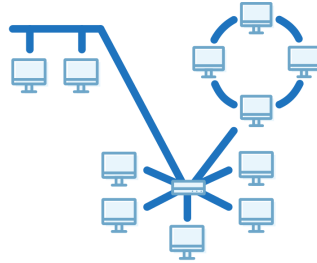


Figura 2.7: Topologia híbrida

Na tabela seguinte, Tabela 2.1, é realizada uma comparação entre as diferentes topologias tendo em conta os seguintes critérios: escalabilidade, fiabilidade, facilidade de manutenção e simplicidade de implementação, divididos em 3 níveis: Baixo (cor vermelha), Moderado (cor amarela) e Elevado (cor verde).

Tabela 2.1: Tabela comparativa entre as diferentes topologias

Topologia	Escalabilidade	Fiabilidade	Facilidade de Manutenção	Simplicidade de Implementação	Pontuação
Ponto a Ponto	Baixa	Moderada	Elevada	Elevada	14
Malha	Elevado	Elevada	Baixa	Baixa	12
Estrela	Moderada	Elevada	Moderada	Elevada	16
Barramento	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	12
Anel	Moderada	Moderada	Baixa	Moderada	10
Árvore	Elevada	Moderada	Baixa	Baixa	10
Híbrida	Elevada	Moderada	Baixa	Baixa	10

Foi realizada, uma atribuição de pontos a cada nível, 1 ponto para o nível Baixo, 3 pontos para o Moderado e 5 para o Elevado. A soma das pontuações está representada na última coluna da tabela.

Fazendo uma análise à tabela podemos concluir que a topologia que apresenta, em média, melhores características é a topologia em Estrela. De uma forma geral, esta topologia é fácil de implementar, requer alguma atenção e manutenção, é fiável e permite alguma escalabilidade. Dependendo do contexto, dos requisitos de cada projeto e de cada implementação, é possível afirmar que a topologia Estrela é a melhor opção.

2.1.2 Protocolos de Comunicação

Protocolos de comunicação são conjuntos de regras e convenções, padronizadas, que definem a forma como dispositivos, presentes na rede, trocam informações entre si. Estas diretrizes definem a estrutura, formato e sequência dos dados transmitidos, garantindo a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos.

Os protocolos são essenciais para assegurar uma comunicação eficiente e confiável, especificando detalhes como a codificação dos dados, a detecção e correção de erros, o estabelecimento e encerramento de ligações, além de outros aspectos relevantes para a transmissão dos dados.

Vão ser apresentados e considerados protocolos de comunicação *wireless*, tipicamente utilizados em aplicações IoT, os quais podem ser enquadrados nas várias topologias consideradas previamente.

Zigbee

O ZigBee é um protocolo de comunicação *Wireless Personal Area Network* (WPAN) baseado na norma IEEE 802.15.4. Foi desenvolvido pela ZigBee Alliance e as suas duas principais propriedades são o baixo custo e o baixo consumo de energia, o que o torna adequado para a domótica [2]. Oferece fiabilidade, rentabilidade, segurança, consumo de energia moderado e suporta topologia em estrela, ponto a ponto e árvore.

Arquiteturas de *Wireless Sensor Network* (WSN) baseadas em ZigBee têm sido aplicadas para monitorizar a temperatura e humidade do solo, bem como para classificar o teor de humidade do solo utilizando métodos de *deep learning* [3].

Apesar da sua utilização comum, um dos principais inconvenientes do ZigBee é o facto de não ter um modo de funcionamento *sleep* [4]. Esta situação pode causar uma gestão de energia ineficiente, que é um fator chave para aplicações IoT. No entanto, a transição entre os modos ativo e de suspensão pode ser conseguida através de programação e hardware adequados.

No contexto da agricultura, os principais desafios da utilização do ZigBee são a gestão ineficiente de energia bem como o baixo alcance e taxa de transmissão de dados. Por conseguinte, a utilização deste protocolo não é adequada quando o terreno agrícola é muito grande e a distância entre os nós de sensores é elevada. Em vez disso, o ZigBee é mais adequado para áreas experimentais de pequena escala.

Wi-Fi

O Wi-Fi é uma das tecnologias sem fios mais antigas e mais utilizadas, tendo a norma IEEE 802.11 sido lançada em 1997. Tem sido reconhecida como a alternativa mais promissora ao *Global Positioning System* (GPS) para serviços de localização

e conscientes do contexto em espaços interiores. É principalmente utilizada em *Wireless Local Area Network* (WLAN) através da utilização das bandas de frequência de 2,4 GHz ou 5 GHz.

Como o Wi-Fi está normalmente disponível em muitos locais interiores e exteriores, é considerado como a primeira opção para várias aplicações IoT, tais como a recolha de dados e a ligação à *cloud* [5]. O seu alcance de transmissão pode ir até 100 metros e a taxa de transmissão de dados pode ir até 150 Mbps [6].

No entanto, o nível de consumo de energia do Wi-Fi é elevado, cerca de 835 mW em modo de transmissão [6, 7]. Desta forma, a utilização do Wi-Fi pode não ser viável em todos os sistemas, pela dificuldade em satisfazer os requisitos de energia em exterior. Para compensar o maior consumo energético, tem sido considerada a utilização de painéis solares fotovoltaicos [8], bem como um ajuste nos intervalos de aquisição e transmissão de dados.

Embora o protocolo Wi-Fi seja uma tecnologia antiga e madura, a principal limitação é o seu elevado consumo de energia. Dessa forma, torna-se quase impossível utilizar este protocolo quando o hardware não pode ser ligado à rede elétrica principal. Embora existam alguns esforços para utilizar painéis solares, isso acarreta custos de instalação e manutenção.

Wi-Fi HaLow

O Wi-Fi HaLow, também conhecido como 802.11ah, lançado e desenvolvido, em 2017, para colmatar as necessidades específicas da IoT, oferece uma conectividade *wireless* eficiente em termos energéticos e com um alcance superior ao Wi-Fi. O Wi-Fi HaLow opera na faixa de frequência sub-gigahertz, o que difere das tradicionais faixas de 2,4 GHz e 5 GHz utilizadas pelo Wi-Fi convencional [9]. Esse ajuste na faixa de frequência proporciona uma melhor penetração de obstáculos e um alcance mais amplo, sendo particularmente útil para aplicações IoT distribuídas em ambientes desafiantes.

As principais vantagens do Wi-Fi HaLow incluem um alcance maior, podendo atingir várias centenas de metros, a sua capacidade de penetrar efetivamente obstáculos físicos, e sua gestão energética eficiente, crucial para dispositivos alimentados por bateria em aplicações IoT. Além disso, o padrão oferece suporte a um grande número de dispositivos conectados simultaneamente, sendo este adequado para cenários nos quais diversos dispositivos IoT precisam se comunicar de maneira eficiente.

No entanto, algumas aspetos também devem ser consideradas. O Wi-Fi HaLow opera em frequências mais baixas, o que significa que a taxa de transmissão de dados pode ser mais baixa em comparação com as versões mais recentes do Wi-Fi convencional. Além disso, a adoção do Wi-Fi HaLow tem sido gradual, e a compatibilidade

com dispositivos existentes pode ser um desafio, já que muitos dispositivos mais antigos podem não suportar esse padrão específico.

Sigfox

O Sigfox é um protocolo de comunicação *wireless* desenvolvido para atender às necessidades específicas da IoT. Com origem em França, no ano de 2010, foi projetado para fornecer uma solução de conectividade eficiente e de baixo consumo de energia para dispositivos IoT numa escala global. A tecnologia opera em frequências de rádio não licenciadas, bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) [10], e utiliza uma abordagem de comunicação de baixa largura de banda, o que permite uma ampla cobertura e um consumo mínimo de energia.

O funcionamento do Sigfox baseia-se em estações base que recebem e transmitem pequenos pacotes de dados, 12 *bytes*, de dispositivos IoT para a nuvem, onde as informações são processadas. A tecnologia é otimizada para dispositivos que precisam de comunicação esporádica e que têm requisitos de baixo consumo de energia, sendo adequada para aplicações como monitorização remota, rastreio de ativos e medições ambientais.

As principais vantagens do Sigfox incluem a sua cobertura global, baixo consumo de energia, custos operacionais reduzidos e a capacidade de lidar com grandes quantidades de dispositivos ligados. A sua arquitetura simplificada também facilita a implementação e integração em diversos setores.

Entretanto, algumas desvantagens devem ser consideradas. A taxa de transferência de dados do Sigfox é limitada e baixa, o que o torna menos adequado para aplicações que requerem comunicações de alta velocidade para um elevado conjunto de dados. Além disso, a tecnologia é mais eficaz para mensagens curtas e intermitentes, não sendo ideal para casos que exigem transmissões contínuas de dados em tempo real.

Bluetooth Low Energy (BLE)

O Bluetooth Low Energy é uma tecnologia de comunicação sem fios que surgiu como uma extensão do padrão Bluetooth clássico para responder às necessidades de dispositivos com requisitos de baixo consumo de energia. Introduzido em 2010 pelo Bluetooth Special Interest Group, o BLE é projetado para permitir a comunicação eficiente entre dispositivos, consumindo quantidades mínimas de energia.

Opera na faixa de 2,4 GHz e oferece uma conexão de curto alcance, sendo ideal para aplicações onde a eficiência energética é crucial, como dispositivos *wearable*, sensores, dispositivos médicos, entre outros. Utiliza um método de transmissão

eficiente denominado *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK) para minimizar o consumo de energia durante a comunicação.

Em comparação ao Bluetooth convencional, no BLE a abordagem de emparelhamento é diferente. Foi projetado para minimizar a necessidade de emparelhamento manual e simplificar a conexão entre dispositivos. Em muitos casos, a comunicação pode ocorrer sem que haja um emparelhamento prévio.

O BLE introduziu o conceito de *Generic Attribute Profile* (GATT) e *Attribute Protocol* (ATT), que permite que dispositivos comuniquem trocando pequenos pacotes de dados chamados atributos. Os dispositivos BLE podem operar em dois modos principais: o modo central e o modo periférico.

No modo periférico, um dispositivo BLE pode transmitir dados sem a necessidade de emparelhamento prévio. Por exemplo, sensores ou dispositivos *beacon* podem enviar informações sem a intervenção do utilizador.

No modo central, um dispositivo procura por dispositivos periféricos BLE disponíveis e pode iniciar uma conexão sem a necessidade de emparelhamento manual. No entanto, em alguns casos, pode ser necessário um emparelhamento para determinadas operações, como acesso a serviços protegidos por senha.

Os pontos fortes do BLE incluem, portanto, o seu baixo consumo de energia, o que prolonga significativamente a vida útil da bateria em dispositivos alimentados por baterias pequenas. Além disso, a capacidade de estabelecer conexões rápidas e a interoperabilidade com uma ampla variedade de dispositivos, tornam o BLE uma escolha popular para aplicações IoT.

No entanto, o BLE também possui alguns pontos fracos. O seu alcance é limitado em comparação com o Bluetooth clássico, tornando-o mais adequado para comunicações de curto alcance. A largura de banda é menor em comparação com outras tecnologias *wireless*, limitando a quantidade de dados que podem ser transmitidos em uma única transação. Em resumo, o BLE é uma escolha interessante para aplicações IoT que priorizam eficiência energética e comunicação de curto alcance.

Narrow Band IoT (NB-IoT)

O NB-IoT surgiu como uma tecnologia de comunicação *wireless* especificamente projetada para responder aos requisitos das aplicações IoT. Padronizado pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), o NB-IoT foi introduzido para proporcionar uma conectividade eficiente, de baixo consumo energético e com uma grande cobertura. O padrão NB-IoT foi incluído nas especificações do 3GPP como parte do *Long-Term Evolution* (LTE), o que permite sua implementação em redes existentes de banda larga móvel.

O NB-IoT opera numa banda de frequência estreita, muitas vezes menor que 200 kHz, característica que origina o nome, utilizando uma pequena largura de

banda para transmitir dados. Esta abordagem oferece uma melhor penetração em edifícios e uma cobertura mais ampla em comparação com tecnologias de banda larga, tornando-a especialmente adequada para ambientes urbanos densos e áreas rurais.

As principais características do NB-IoT são a sua eficiência energética, que prolonga a vida útil da bateria em dispositivos IoT e sua capacidade de lidar com um grande número de dispositivos conectados simultaneamente. Além disso, a integração com redes LTE já existentes permite uma transição suave e uma infraestrutura robusta.

No entanto, algumas desvantagens devem ser consideradas. A taxa de transferência de dados do NB-IoT é relativamente baixa em comparação com tecnologias de banda larga, podendo variar entre algumas dezenas de kbps até centenas de kbps, o que pode limitar sua adequação para aplicações que exigem transmissões de dados a alta velocidade. Além disso, a latência pode ser maior em comparação com tecnologias de maior largura de banda, o que pode ser impactante em aplicações sensíveis ao tempo.

O NB-IoT é uma solução focada em proporcionar conectividade eficiente e de baixo consumo energético em dispositivos IoT, especialmente em cenários que seja imperativo uma cobertura abrangente e uma penetração aprimorada em ambientes desafiantes.

Long-Range (LoRa) e Long-Range Wide Area Network (LoRaWAN)

Criada pela SemTech, LoRa é um protocolo de comunicação de baixo consumo energético e longo alcance para dispositivos de radiofrequência, que operam em gamas de frequência já definidas em cada país. Em Portugal, as frequências são os 433 MHz e os 868 MHz. Em meados de 2015, a empresa LoRa Alliance lançou o protocolo LoRaWAN, baseado na tecnologia LoRa.

LoRaWAN, por sua vez, foi sofisticado para aceder às camadas mais altas da aplicação e integrar a comunicação dos dispositivos com a *internet*. Outro fator importante é que os dispositivos LoRaWAN não são apenas módulos de radiofrequência, são também compostos por micro controladores dedicados e outros componentes, responsáveis por conectar o dispositivo à rede e garantir a segurança da ligação.

Uma das principais vantagens do LoRaWAN é permitir a comunicação a longas distâncias, com um consumo mínimo de energia. Uma simples *gateway* LoRaWAN ou estação base pode cobrir cidades inteiras por vários quilómetros, dependendo da topografia do local onde é instalada. O seu alcance médio em zonas urbanas é de 5 km e em áreas rurais sem nenhum bloqueio, pode ultrapassar os 15 km.

Lorawan é maioritariamente considerado em aplicações de IoT, tais como sensores e pontos de recolha de dados remotos, como sensores de pressão e luminosidade,

sensores on-off, sondas de temperatura ou equipamentos alimentados a bateria que comuniquem por meio de mensagens curtas [11].

O LoRaWAN suporta 3 classes de dispositivos: A, B e C, permitindo comunicação bidirecional para sensores simples, dispositivos móveis e dispositivos que requerem *download* de dados.

A classe A é a mais eficiente em termos de energia, funcionando em ciclos assíncronos, nos quais os dispositivos transmitem dados e abrem breves janelas de receção para *downlinks*. A classe B, para além do comportamento da classe A, introduz *slots* de tempo de receção programados em intervalos regulares, proporcionando uma previsibilidade melhorada à custa de uma maior latência. Por último, a classe C mantém o recetor continuamente ligado, exceto durante a transmissão, oferecendo a menor latência, mas com um consumo de energia mais elevado em comparação com as outras classes. A escolha entre as classes depende das necessidades específicas da aplicação, equilibrando eficiência energética, latência e previsibilidade da receção.

Cada classe responde a diferentes requisitos de dispositivos IoT, proporcionando flexibilidade para uma variedade de cenários de uso. A classe A é frequentemente escolhida para dispositivos alimentados por bateria, enquanto a classe B é adequada para aplicações que requerem previsibilidade na receção. Por outro lado, a classe C é preferida em casos em que a latência é crítica e o consumo de energia não é uma restrição significativa. Esta variedade de classes permite que o LoRaWAN seja adaptado para uma ampla gama de aplicações, desde sensores de baixa potência até dispositivos conectados à rede elétrica [12].

Na tabela 2.2 é apresentada de uma forma resumida cada um dos protocolos, comparando 5 características importantes: frequência de operação, taxa de transmissão, largura de banda, alcance e consumo energético.

Tabela 2.2: Tabela comparativa entre os diferentes protocolos

Protocolo	Frequência de Operação	Taxa de Transmissão	Largura de Banda	Alcance	Consumo Energético
ZigBee [6, 7]	868, 915 MHz e 2.4 GHz	20, 40 e 250 kbps	2 MHz	100 m	Baixo (36,9mW)
Wi-Fi [6, 7]	2.4 e 5 GHz	11-54 e 150 Mbps	22 MHz	100 m	Alto (835mW)
Wi-Fi HaLow [13]	Sub-GHz	150 Kbps - 78 Mbps	1-16 MHz	1 km	Médio (200mW)
SigFox [6, 7]	868/915 MHz	100 bps	<100Hz	10 km	Baixo (122mW)
BLE [6, 7]	2.4 GHz	1 Mbps	1 MHz	10 m	Muito Baixo (10mW)
NB-IoT [6, 7]	Frequência LTE	170-250kbps	180 KHz	1 Km, 10 km	Baixo (150 mW)
LoRaWAN [6, 7]	EU433 e EU868	50 kbps	<500 KHz	5 km	Baixo (100mW)

2.2 Módulos IoT

Na vanguarda da revolução tecnológica, os módulos IoT emergem como peças fundamentais no cenário da conectividade inteligente. Estes módulos representam uma abordagem modular para a implementação de dispositivos interoperáveis, combinando não apenas poder computacional, mas também recursos essenciais como sensores, módulos de comunicação e interfaces de conectividade. Ao incorporar tais módulos em projetos, os desenvolvedores podem criar sistemas eficientes, escaláveis e interativos, adaptáveis às exigências da era digital. No contexto específico da agricultura, a aplicação de módulos IoT oferece uma revolução, permitindo uma monitorização remota, análise de dados em tempo real e otimização de recursos para alcançar práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

2.2.1 Módulos de Comunicação

Os módulos de comunicação desempenham um papel crucial nos dispositivos IoT, possibilitando a troca de dados entre esses dispositivos e outros sistemas. Estes módulos incorporam tecnologias *wireless*, tais como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa, Sigfox, entre outras, para estabelecer ligações e permitir a transmissão eficiente de informação. A escolha do módulo de comunicação depende das necessidades específicas do projeto, como o alcance, o consumo de energia, a largura de banda, os requisitos de segurança e o custo. Estes módulos facilitam a conectividade remota, permitindo a recolha de dados, a monitorização em tempo real e a interação entre dispositivos IoT, desempenhando um papel vital na construção de ecossistemas conectados e inteligentes.

Alguns aspetos devem ser tidos em consideração quando se está a desenvolver soluções onde existem módulos com funções específicas, como por exemplo, de comunicação. Alguns projetos podem exigir funcionalidades específicas que podem não ser totalmente atendidas pelos módulos. Estes, por sua vez, podem ter requisitos específicos de consumo energético, o que pode ser um fator crítica, especialmente em dispositivos alimentados por baterias. Em projetos mais complexos, a integração de múltiplos módulos pode ser desafiante, exigindo um planeamento mais cuidadoso.

Podem ser apresentados os seguintes módulos de comunicação, como por exemplo, o ESP8266, que permite a capacidade de comunicação por Wi-Fi. O XBee que permite comunicações por Zigbee. O SX1278, Figura 2.8, utilizado para comunicações LoRa, este modulo consegue comunicações até 10 km em linha de vista. Existem muitos outros módulos que viabilizam a comunicação pelos restantes protocolos.



Figura 2.8: Módulo LoRa 433MHz SX1278 / RA-02

2.2.2 Microcontroladores

Micro controladores desempenham um papel essencial no ecossistema IoT, especialmente em aplicações voltadas para a agricultura. Estes dispositivos compactos e autónomos incorporam um processador, memória e periféricos dentro um único chip, permitindo um maior controlo e processamento de dados. No contexto da IoT agrícola, os micro controladores são frequentemente implementados em módulos dedicados, proporcionando funcionalidades específicas, tais como sensores de solo, controlo de irrigação e recolha de dados meteorológicos. A sua capacidade de operar com eficiência energética torna-os ideais para aplicações alimentadas a bateria, enquanto a sua adaptabilidade e flexibilidade de design possibilitam soluções personalizadas para atender às necessidades específicas da agricultura de precisão. Estes micro controladores, quando integrados em módulos IoT, desempenham um papel crucial na transformação digital do setor agrícola, impulsionando a eficiência operacional e a sustentabilidade.

O RP2040, Figura 2.9, desenvolvido e lançado em 2021 pela Raspberry Pi Foundation, tem se destacado como uma opção acessível e poderosa para uma variedade de aplicações, desde projetos educacionais até dispositivos IoT e sistemas embebidos. A combinação de alto desempenho, recursos integrados e um custo acessível torna-o numa escolha atraente para muitos desenvolvedores.

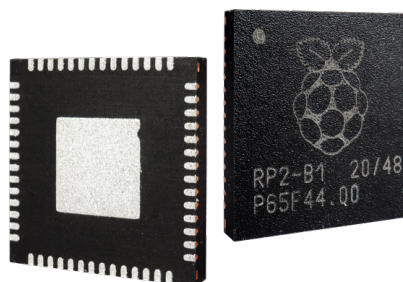


Figura 2.9: RP2040

Apresenta uma arquitetura dual-core ARM Cortex-M0+, proporcionando uma maior capacidade de processamento e flexibilidade para manipular tarefas simultâneas. Possui memória *Random Access Memory* (RAM), vários pinos de *General Purpose Input / Output* (GPIO) com o objetivo de se ser possível a ligação a múltiplos dispositivos ou sensores. Permite também *Pulse Width Modulation* (PWM), I2C, *Universal Asynchronous Receiver / Transmitter* (UART) e *Serial Peripheral Interface* (SPI), entre muitas outras características que o tornam bastante interessante.

2.2.3 Módulos Integrados

No cenário dinâmico da conectividade inteligente, os módulos integrados IoT desempenham um papel crucial, reunindo recursos essenciais em formatos compactos e eficientes. Sejam *System-on-Chips* (SoC) ou *System-on-Modules* (SoM), estes módulos representam uma abordagem modular que incorpora processamento, memória e conectividade, fornecendo uma base sólida para a construção de dispositivos IoT inovadores. Ao simplificar o desenvolvimento de hardware, esses módulos oferecem uma vantagem significativa, permitindo a rápida implementação de soluções integradas.

SoC

Os módulos integrados SoC são componentes eletrônicos que incorporam diversos elementos essenciais de um sistema num único *chip*, tais como *Central Processing Unit* (CPU), *Graphics Processing Unit* (GPU), controladores de memória, periféricos, interfaces de comunicação e, em alguns casos, até mesmo módulos de conectividade *wireless*. Noutras palavras, um SoC integra num único dispositivo uma variedade de funcionalidades que normalmente requereriam vários componentes individuais. Esta integração dentro do mesmo *chip* permite otimizar o desempenho e a eficiência energética do sistema, o que é importante para dispositivos que usam bateria. Além disso, um SoC tende a ser mais compacto que processadores separados, o que melhora a portabilidade.

Esta tecnologia é amplamente utilizada em dispositivos móveis, tais como *smartphones* ou *tablets*, onde o Snapdragon 8cx Gen 3, Figura 2.10, é o SoC mais recente e avançado da Qualcomm.

Porém em dispositivos IoT, os módulos integrados SoC são frequentemente utilizados para fornecer uma solução compacta e eficiente, incluindo conectividade, sensores e capacidades de processamento. São projetados tendo como foco a eficiência energética, especialmente importante em dispositivos alimentados por bateria. A STMicroelectronics possui uma grande diversidade de SoC, entre eles o STM32WL,



Figura 2.10: Qualcomm Snapdragon 8cx Gen 3

Figura 2.11, que integra ao mesmo tempo funções de micro controlador como conectividade *wireless* de protocolos como o LoRaWAN ou o Sigfox.



Figura 2.11: STM32WL

SoM

SoM significa "System-on-Module" e refere-se a um módulo compacto que incorpora não só um processador, mas também outros componentes essenciais para a construção de um sistema eletrónico. Um SoM normalmente inclui o processador (que geralmente é um SoC), memória RAM, armazenamento flash, e pode incluir algumas outras funcionalidades, como por exemplo controladores de energia e módulos de conectividade. Os SoM são pensados e desenvolvidos com o objetivo de serem incorporados em placas de circuito impresso, *Printed Circuit Board* (PCB), maiores, proporcionando uma solução modular e facilitando o desenvolvimento de produtos.

O exemplo de um SoM é o Raspberry Pi Compute Module 4, Figura 2.12, constituído por um SoC ARM Cortex-A72, desenvolvido pela Arm Holdings. Incorpora também módulos *High-Definition Multimedia Interface* (HDMI), memória RAM, opções de conectividade tais como Wi-Fi, tanto 2.4GHz como 5GHz, Bluetooth 5.0 e BLE, sendo necessárias as respetivas antenas externas.

Os módulos SOM normalmente têm um formato compacto e seguem padrões específicos de tamanho e um *layout* definido de pinos. Isso facilita a substituição ou atualização do módulo sem a necessidade de modificar o projeto da placa principal. Ao utilizarem estes módulos, os desenvolvedores podem reduzir significativamente o



Figura 2.12: Raspberry Pi Compute Module 4

tempo de desenvolvimento, já que muitos dos componentes críticos e de funcionalidade básica já estão integrados e testados.

A característica de serem tão modulares é uma vantagem, uma vez que facilita a gestão do ciclo de vida do produto, permitindo atualizações incrementais ou substituições conforme seja necessário.

2.3 Sensorização

Sensores são dispositivos essenciais na era da tecnologia, projetados para converter informações físicas ou ambientais em sinais elétricos ou dados digitais. Estes dispositivos detetam e medem variáveis como luz, temperatura, pressão, movimento, humidade, entre outras, fornecendo dados valiosos para monitorizar, controlar e automatizar diversas aplicações. A evolução dos sensores acompanha o progresso tecnológico, desde dispositivos mecânicos e analógicos até os modernos sensores digitais e inteligentes. Surgiram, inicialmente, para responder às necessidades industriais e científicas, mas rapidamente expandiram seu alcance para uso quotidiano, como em *smartphones*, automóveis e eletrodomésticos, transformando a forma como interagimos com o ambiente ao nosso redor.

No contexto IoT, os sensores desempenham um papel crucial, sendo a espinha dorsal de uma rede interoperável. Sensores IoT são projetados para adquirir dados em tempo real, transmiti-los pela *internet* e permitir a tomada de decisões informadas. Estes sensores contribuem para a criação de cidades inteligentes, agricultura de precisão, monitorização da saúde, gestão de ativos, entre outras aplicações inovadoras que impulsionam a eficiência e a conectividade em diversas áreas da vida moderna.

2.3.1 Sensores de Temperatura e Humidade do Ar

Os sensores de temperatura do ar são dispositivos projetados para medir a temperatura ambiente num determinado local. Estes sensores desempenham um papel essencial em diversas aplicações, desde sistemas de climatização e monitorização meteorológica até dispositivos eletrónicos sensíveis à temperatura.

No contexto da *Internet of Things*, os sensores de temperatura são componentes cruciais para a aquisição de dados ambientais em tempo real, permitindo a integração dessas informações em sistemas conectados. Sensores de temperatura IoT operam com a premissa de capturar dados de temperatura do ambiente e transmiti-los pela rede para análise. Dois tipos comuns de sensores de temperatura em cenários IoT são os sensores digitais baseados em circuitos integrados e os sensores de temperatura sem fio.

No contexto da agricultura de precisão, os sensores de temperatura do ar desempenham um papel vital na otimização dos processos agrícolas, ajudando os agricultores a tomar decisões informadas e melhorar a gestão das culturas.

Os sensores de humidade desempenham um papel igualmente fundamental na agricultura de precisão. São dispositivos projetados para medir a quantidade de vapor de água presente no ar num determinado ambiente. Existem diferentes tipos de sensores de humidade, cada um utilizando princípios de medição específicos. Entre eles, os mais comuns são os capacitivos e os resistivos.

Sensores de humidade capacitivos

Os sensores de humidade capacitivos são baseados na variação da capacitância de um material higroscópico em resposta à humidade. Geralmente, uma camada de polímero sensível à humidade é colocada entre dois eléctrodos. À medida que a humidade do ar muda, a capacitância do material também muda. O sensor mede essa alteração capacitiva e converte num sinal eléctrico proporcional ao nível de humidade. Esses sensores são conhecidos pela sua resposta rápida e precisa.

Sensores de humidade resistivos

Os sensores de humidade resistivos funcionam por meio de um material higroscópico que altera sua resistência eléctrica em resposta à humidade. Um elemento sensor, muitas vezes feito de polímeros ou cerâmica, é exposto ao ar, à medida que a humidade aumenta ou diminui, a resistência do elemento sensor também varia. Isso é medido e convertido em leituras de humidade relativa.

A integração de sensores de temperatura e humidade do ar na agricultura de precisão através da IoT oferece uma abordagem mais inteligente e personalizada para a gestão agrícola, permitindo uma produção mais sustentável, eficiente e adaptada às condições climáticas específicas de cada região.

2.3.2 Sensor de Radiação

Sensores de radiação desempenham um papel significativo na agricultura de precisão quando integrados no contexto IoT. Estes sensores capturam dados sobre a radiação solar incidente, auxiliando os agricultores na compreensão das condições ambientais e permitindo decisões mais informadas. Funcionam com base em princípios específicos para medir a quantidade de energia eletromagnética que é proveniente do sol. Existem diversos tipos de sensores de radiação, entre os quais, os piranômetros e sensores de radiação em comprimentos de onda específicos.

Piranómetro

Um piranómetro, Figura 2.13, é projetado para medir a radiação solar global, ou seja, a soma da radiação solar direta e difusa. Consiste numa cúpula de vidro transparente que cobre um sensor sensível à radiação. A cúpula de vidro permite que a radiação solar incidente atinja o sensor interno. Esse sensor é aquecido pela radiação e gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de radiação solar recebida.

O sinal elétrico é então convertido em uma leitura de irradiância, geralmente expressa em Watts por metro quadrado (W/m^2). Os piranómetros precisam de ser calibrados para fornecer leituras precisas.



Figura 2.13: piranómetro

Sensores de radiação em comprimentos de onda específicos

Sensores de radiação em comprimentos de onda específicos, tais como os utilizados para medir a Radiação Fotossintética Ativa, *Photosynthetically Active Radiation* (PAR), são sensíveis à faixa de comprimentos de onda importantes para a fotossíntese das plantas. Estes sensores capturam a quantidade de radiação na faixa de comprimentos de onda específica e convertem essa informação numa leitura representativa da radiação PAR disponível.

Os dados de radiação solar são fundamentais para otimizar o crescimento vegetal. A quantidade adequada de luz solar é essencial para a fotossíntese, influenciando a produção de clorofila e, portanto, a saúde e a produtividade das plantas. Além da quantidade de radiação, os sensores podem avaliar a qualidade da luz solar. Isso é particularmente importante em ambientes controlados, como estufas, onde ajustes na composição espectral da luz podem ser feitos para otimizar o desenvolvimento das plantas.

A combinação de dados de sensores de radiação com outros parâmetros, como temperatura e humidade, permite a otimização da eficiência hídrica. Os agricultores podem ajustar os padrões de irrigação com base nas condições de radiação e nas necessidades hídricas das plantas.

2.3.3 Pluviómetro

Os pluviómetros desempenham um papel crucial na agricultura de precisão, fornecendo dados precisos sobre a quantidade de precipitação numa determinada área. Integrar pluviómetros no contexto IoT acrescenta uma componente adicional à recolha de dados meteorológicos, permitindo uma monitorização em tempo real e tomadas de decisões ainda mais precisas, relativas a estratégias de irrigação e gestão de recursos.

Existem vários tipos de pluviómetros, desde modelos tradicionais, como o pluviómetro de recipiente basculante, até versões mais avançadas que utilizam tecnologia de pesagem ou sensores acústicos para medir a quantidade de chuva. Dados precisos de precipitação ajudam os agricultores a ajustar as suas práticas de irrigação com base nas condições climáticas reais. Isso previne irrigação excessiva em períodos chuvosos e garante uma oferta adequada de água durante os períodos secos.

Pluviómetros IoT normalmente utilizam sensores eletrónicos para medir a precipitação. Estes sensores podem incluir dispositivos óticos, acústicos ou capacitivos que detetam a presença e a quantidade de água. Para integração numa aplicação IoT, esses pluviómetros são equipados com tecnologias *wireless*, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee ou LoRa, permitindo a transmissão instantânea de dados para uma plataforma centralizada.

Os dados coletados por pluviómetros IoT podem ser partilhados e contribuir para modelos de previsão meteorológica mais precisos. Isso beneficia não apenas os agricultores locais, mas também a comunidade em geral.

2.3.4 Sensores de Temperatura e Humidade do Solo

Sensores de temperatura e humidade do solo são também componentes cruciais em aplicações agrícolas e ambientais, desempenhando um papel fundamental na

gestão eficiente dos recursos hídricos e na monitorização das condições ideais para o crescimento das plantas.

Os sensores de temperatura do solo medem a temperatura no próprio solo, fornecendo dados sobre as condições térmicas no ambiente de cultivo. Podem ser enterrados em diferentes profundidades de forma a capturar variações nas diferentes camadas do solo. Estes sensores normalmente utilizam termistores ou termopares para medir a temperatura. À medida que a temperatura varia, a resistência elétrica do termistor ou a diferença de potencial no termopar também varia, permitindo uma leitura precisa da temperatura. A recolha desta informação é crucial para entender a atividade biológica, determinar o momento ideal de plantio e colheita, e otimizar processos agrícolas.

Por outro lado, os sensores de humidade do solo medem o conteúdo de água presente no solo. Conhecer estes valores é vital para a gestão eficiente da irrigação, evitando tanto a escassez quanto o excesso de água nas raízes das plantas. Diferentes tecnologias podem ser aplicadas, incluindo sensores capacitivos, Figura 2.14, ou resistivos, tais como nos sensores de temperatura e humidade do ar, ou técnicas de propagação de ondas. Esses sensores convertem a humidade do solo em sinais elétricos mensuráveis.

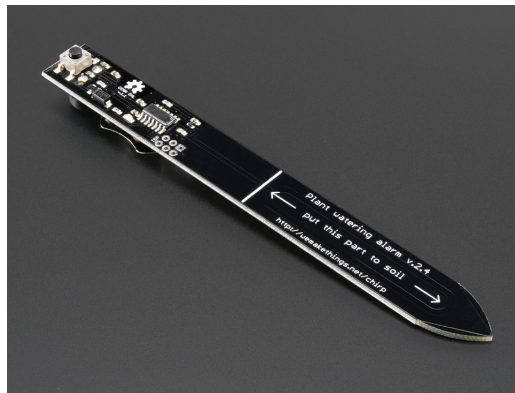


Figura 2.14: Sensor capacitivo de humidade do solo

2.4 Alimentação Elétrica

A alimentação elétrica em dispositivos IoT para aplicações agrícolas é um aspeto crucial, especialmente quando se considera a natureza remota e, muitas vezes, dispersa dos dispositivos. Diferentes abordagens podem ser adotadas para garantir uma fonte de energia confiável e sustentável, entre elas pilhas, baterias ou então painéis solares, utilizando técnicas de *energy harvesting*.

2.4.1 Pilhas

Uma pilha é um dispositivo eletroquímico que converte energia química em energia elétrica. Consiste em dois elétrodos (um positivo e um negativo) separados por um eletrólito. As pilhas são geralmente projetadas para uso único e não recarregável.

Em aplicações IoT, a escolha das pilhas é crucial, pois, muitas vezes, os dispositivos são instalados em ambientes remotos e de difícil acesso. Diversos fatores, como consumo de energia, vida útil da bateria, tamanho e temperatura de operação, influenciam a seleção das pilhas mais apropriadas.

Pilhas Alcalinas

As pilhas alcalinas são amplamente utilizadas devido à sua disponibilidade, durabilidade e custo acessível. São não recarregáveis e têm uma vida útil relativamente longa. São adequadas para dispositivos IoT de baixo consumo energético, como sensores de monitorização ambiental.

Pilhas de Lítio

Pilhas de lítio são também pilhas não recarregáveis e são conhecidas pela sua elevada densidade energética (Wh/kg), ou seja, pela capacidade de armazenar mais energia tendo a mesma massa que uma pilha alcalina, por exemplo, e pela capacidade de operar numa ampla faixa de temperaturas, característica vital em aplicações de agricultura de precisão, onde os dispositivos estão sujeitos às condições climáticas.

Pilhas Zinco-Óxido de Prata

Estas pilhas são conhecidas e utilizadas devido a conseguirem manter uma tensão constante. São frequentemente utilizadas em dispositivos eletrónicos de pequeno porte.

2.4.2 Baterias

Uma bateria é um dispositivo composto por duas ou mais pilhas conectadas em série ou paralelo. O termo "bateria" é normalmente utilizado para fazer referência a um dispositivo que fornece energia elétrica e que pode ser recarregado. Diferentemente das pilhas individuais, as baterias são recarregáveis e podem passar por ciclos de carga e descarga várias vezes antes de perderem significativamente sua capacidade.

Em aplicações IoT e contexto agrícola, a escolha da bateria é crucial para garantir um fornecimento de energia confiável e eficiente. As baterias desempenham um papel fundamental, especialmente em dispositivos que podem operar em ambientes remotos e exigem longa vida útil.

Baterias de Iões de Lítio (Li-Ion)

Uma bateria de íons de lítio ou bateria Li-Ion é um tipo de bateria recarregável que utiliza compostos de lítio como um dos eletrodos. Em comparação com a tecnologia tradicional de baterias recarregáveis de níquel ou níquel-cádmio, as baterias de íons de lítio possuem diversas vantagens: em primeiro lugar são carregadas em menos tempo e demoram mais tempo em se descarregarem, mas, além disso, têm uma densidade de energia superior, não têm efeito memória e praticamente não perdem carga quando não são usadas, entre outros fatores.

No entanto, como qualquer tecnologia, apresentam certas desvantagens relacionadas principalmente com a proteção (devem incluir sistemas para evitar as sobrecargas e o sobreaquecimento) e o custo (apesar de ter um preço menor, o custo de produção continua a ser aproximadamente 40% mais caro do que os custos das baterias de níquel-cádmio).

As vantagens das baterias de íons de lítio e seu custo decrescente fizeram com que fossem utilizadas em muitas áreas, tais como sistemas de energia de emergência, armazenamento de energia solar, eletrônica de consumo e dispositivos móveis.

Baterias de Polímero de Lítio (Li-Po)

Tal como o próprio nome indica, as baterias Li-Po também usam lítio na sua composição, no lado negativo do componente. Já a extremidade positiva é composta por diferentes compostos químicos, polímeros. Apesar de serem mais leves e mais flexíveis do que as baterias Li-Ion, as Li-Po também conseguem guardar mais energia em menos espaço. Com isso, as fabricantes conseguem criar baterias menores e mais finas que as de Li-Ion, mas, ainda assim, com a mesma quantidade de energia. Característica interessante no contexto IoT, quando um dos requisitos de um dispositivo é ser de pequenas dimensões.

Embora tenham mais vantagens em relação às baterias Li-Ion, as Li-Po não são tão interessantes do ponto de vista financeiro pois têm um custo de fabrico substancialmente mais elevado. As vantagens apresentadas pelas baterias Li-Po acabam não compensando o custo maior, uma vez que os dois tipos de bateria são recarregáveis, contam com um desempenho energético semelhante e têm um ciclo de vida semelhante.

Baterias de Iões de Lítio de Estado Sólido

Uma bateria de lítio de estado sólido é uma tecnologia de bateria composta por elétrodos e um eletrólito sólidos, em vez dos eletrólitos líquidos ou de gel de polímero encontrados nas baterias de Li-Ion ou Li-Po. Os eletrólitos sólidos não são uma novidade, pois foram descobertos no séc. XIX. Foram descartados, na altura, por terem uma densidade energética baixa, algo que já não acontece nos dias de hoje. Têm potencial para oferecer uma maior densidade energética porque o eletrólito sólido é mais compacto. Isto significa que as baterias de estado sólido podem armazenar mais energia no mesmo espaço, entre duas vezes a 10 vezes mais, comparativamente às baterias de iões de lítio. Ao ter um eletrólito sólido, elimina-se o risco de fuga de líquido, por exemplo, em caso de acidente, o que reduz significativamente o risco de incêndio. Prometem também uma vida útil superior em comparação com as baterias Li-Ion, devido à sua maior estabilidade química são menos suscetíveis à degradação causada pelos ciclos de carga e descarga.

Esta estabilidade química superior permite uma outra vantagem importante: tempos de carregamento mais rápidos. A gestão térmica da bateria também é mais simples, não requer tantos sistemas de monitorização e controlo da bateria, aumentando também a sua eficiência.

Apesar de parecerem uma melhor opção relativamente a outros tipos de baterias, a maior desvantagem das baterias de estado sólido é o seu custo, tanto de matérias-primas como de fabrico. No primeiro caso, as baterias de estado sólido usam ânodos de alta densidade e o lítio tem sido o material preferido. Precisam, assim, de mais lítio do que as de iões de lítio e isso é um problema, o preço do lítio só tem tendência a subir, uma vez que a procura cresce mais depressa que a oferta. Por outro lado, o processo de fabrico é totalmente distinto do das baterias de iões de lítio existentes, processo esse mais dispendioso.

2.4.3 Painéis Solares Fotovoltaicos

Painéis solares são uma opção sustentável para alimentar dispositivos IoT em áreas agrícolas. Convertem a luz solar em energia elétrica e podem carregar baterias recarregáveis ao longo do tempo, proporcionando uma fonte de energia constante.

A utilização de painéis solares permite que os dispositivos sejam mais autônomos, exigindo menos intervenção humana para a substituição de baterias. No entanto, a eficácia depende da exposição à luz solar na área de instalação.

Os painéis solares são compostos por células fotovoltaicas, que são feitas por materiais semicondutores, tais como o silício. O silício possui propriedades que permitem a geração de eletricidade quando exposto à luz solar. Quando a luz solar incide sobre as células fotovoltaicas, os fótons (partículas de luz) são absorvidos pelo material semicondutor. A energia dos fótons é então transferida para os elétrons presentes no material, excitando-os, criando uma diferença de potencial entre as camadas do material semicondutor. Essa diferença de potencial resulta num fluxo de elétrons, gerando uma corrente elétrica.

A principal desvantagem de sistemas alimentados unicamente por painéis solares é a dependência de luz solar, ou seja, em dias encobertos onde a corrente elétrica necessária para alimentar o sistema é superior àquela que está a ser gerada pelo painel, o sistema não funciona ou funciona de forma deficiente. Um outro problema, que ocorre todos os dias, é quando fica de noite, não havendo luz solar e os painéis não geram qualquer energia.

2.4.4 Sistema de Alimentação Híbrido

A utilização de painéis solares, integrados com uma bateria recarregável e um gestor de energia, permitem a utilização de um sistema de alimentação híbrido sustentável. Este sistema incorpora uma abordagem inteligente para otimizar o consumo de energia, garantindo uma operação contínua e eficiente em diferentes condições ambientais. O componente-chave é o gestor de energia, responsável por tomar decisões inteligentes sobre quando utilizar a energia solar, quando carregar a bateria e quando usar a energia armazenada durante períodos sem luz solar. Esta abordagem contribui para a sustentabilidade, autonomia e eficiência energética do sistema, essenciais para aplicações de IoT em ambientes agrícolas remotos e variáveis.

Capítulo 3

Estado da Arte

Agricultura de precisão, ou *Smart Farming*, é composta por um conjunto de tecnologias tais como sensores [14], sistemas de informação, robôs [15] e gestores de informação, que se interligam de forma a otimizar a produção, tendo em conta a variabilidade e as incertezas dos sistemas agrícolas [16].

Nos últimos anos, as tecnologias de redes de baixa potência e longa distância, LPWAN, têm revolucionado as práticas agrícolas, permitindo a monitorização de variáveis ambientais em larga escala, com baixo consumo energético e custos reduzidos. Implementações de IoT na agricultura, utilizando protocolos como LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT, têm demonstrado grande potencial para aumentar a eficiência na gestão de recursos, tais como a água e a energia, ao mesmo tempo que minimizam o impacto ambiental.

3.1 LoRaWAN em Implementações Agrícolas

A tecnologia LoRaWAN tem sido amplamente adotada em sistemas agrícolas devido à sua capacidade de comunicação em longas distâncias, aliada a um consumo energético muito baixo. No estudo de Davcev *et al.* (2018) [17], foi desenvolvido um sistema IoT para monitorização de uma vinha, utilizando sensores de temperatura, humidade e humidade do solo conectados através de uma rede LoRaWAN. Este sistema demonstrou alta eficiência energética e flexibilidade, com sensores colocados a até 1 km de distância da estação base, transmitindo dados para a plataforma na *cloud*, onde foram analisados e visualizados.

Adicionalmente, o trabalho de Tresca *et al.* (2019) [18] destacou a capacidade de ajustar o *Spreading Factor* (SF) e a largura de banda para otimizar o alcance de comunicação do LoRaWAN, sem comprometer a eficiência energética. Os testes mostraram que, com o SF configurado adequadamente, é possível garantir uma transmissão de dados estável até 7 km, com uma perda de pacotes inferior a 5%, o que é crucial para o sucesso da IoT em cenários agrícolas dispersos. Estes estudos demonstram a adaptabilidade do LoRaWAN em diferentes ambientes agrícolas, oferecendo a flexibilidade necessária para monitorizar parâmetros de forma eficiente em tempo real.

Um outro estudo relevante foi realizado por Bacco *et al.* (2018) [19], onde o protocolo LoRaWAN foi utilizado numa solução de monitorização de estufas. A solução envolveu o uso de sensores para monitorizar a humidade e a temperatura em estufas, com o objetivo de otimizar as condições de crescimento das plantas. Este estudo destacou a importância do baixo consumo energético em sistemas agrícolas, particularmente quando a operação se dá em áreas com fontes de energia limitadas.

3.2 Sigfox e NB-IoT no Setor Agrícola

Enquanto o LoRaWAN oferece flexibilidade e escalabilidade, o Sigfox é outra solução LPWAN que se destaca pela simplicidade e baixo custo. O Sigfox, mencionado por Tresca *et al.* (2019) [18], é eficiente em termos de energia, mas tem uma taxa de transmissão de dados limitada, o que pode restringir a sua aplicação em cenários agrícolas que exijam a recolha de grandes volumes de dados ou a monitorização de múltiplos parâmetros simultaneamente. Apesar disso, o Sigfox é amplamente utilizado em sistemas de monitorização contínua, onde a transmissão de pequenos pacotes de dados é suficiente, como no caso de monitorizações climáticas básicas.

Por outro lado, o NB-IoT, tecnologia que utiliza bandas licenciadas, proporciona melhor cobertura em ambientes urbanos e rurais, sendo adequado para aplicações que requerem maior largura de banda. O estudo de Davcev *et al.* (2018) [17] comparou as três tecnologias (LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT) e concluiu que, embora o NB-IoT ofereça vantagens como maior capacidade de transmissão de dados, depende de operadores de telecomunicações, o que pode torná-lo menos acessível para áreas rurais, onde soluções como o LoRaWAN ainda são preferíveis devido à sua flexibilidade e custo reduzido.

3.3 Eficiência Energética e Desafios Tecnológicos

Um dos principais desafios na implementação de redes IoT agrícolas é a necessidade de garantir eficiência energética a longo prazo. Em áreas remotas, onde a substituição de baterias é difícil e dispendiosa, tecnologias como o LoRaWAN são

fundamentais, já que permitem que os dispositivos operem por anos sem necessidade de manutenção frequente. Tresca *et al.* (2019) [18] destacaram que o LoRaWAN, com a sua modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), mantém um baixo consumo energético, enquanto maximiza o alcance da comunicação, tornando-o ideal para monitorização agrícola.

Outro ponto importante é a segurança nas redes LPWAN. Segundo Davcev *et al.* (2018) [17], redes IoT agrícolas são suscetíveis a ataques de replicação de nós e clonagem de *gateways*. Para mitigar essas ameaças, tecnologias como o LoRaWAN utilizam encriptação ponta a ponta e mecanismos de autenticação para garantir a integridade e a confidencialidade dos dados transmitidos. O trabalho de Bacco *et al.* (2018) [19] também mencionou a importância de implementar medidas robustas de segurança sem comprometer a eficiência energética, especialmente em redes agrícolas de larga escala.

Capítulo 4

Implementação de *Hardware*

Este capítulo explora a idealização e concepção do dispositivo, detalhando os componentes e as decisões de desenho que contribuem para a sua funcionalidade, eficiência e fiabilidade. As secções seguintes fornecem uma visão geral abrangente da arquitetura do sistema, da seleção de componentes, das estratégias de gestão de energia e dos desafios enfrentados durante o processo, juntamente com as soluções implementadas para os resolver.

4.1 Introdução

No âmbito da agricultura de precisão, a integração de tecnologias IoT é cada vez mais essencial para otimizar o uso de recursos e melhorar a produtividade agrícola. A PCB *Tribe Lab Sensor Extension Network for Smart Environment* (TL.SENSE) é um componente de *hardware* especializado projetado para realizar sensorização e transmissão de dados dentro de uma rede IoT utilizando uma comunicação de longo alcance e baixa potência LoRa.

Esta PCB foi projetada para responder à crescente necessidade de *sensor nodes* eficientes, fiáveis e de baixo consumo energético, capazes de operar de forma autónoma durante longos períodos de tempo. Ao integrar sensores comerciais com tecnologias avançadas com uma estrutura de comunicação LPWAN, especificamente utilizando a tecnologia LoRa, a TL.SENSE aborda desafios chave na agricultura moderna.

O principal objetivo do desenvolvimento da TL.SENSE é criar um dispositivo PnP que se integre facilmente numa rede IoT, permitindo a aquisição e transmissão de dados em tempo quase real. Esta funcionalidade é essencial para suportar processos de tomada de decisão baseados em dados na agricultura, onde informações oportunas e precisas sobre as condições ambientais podem ter um impacto significativo na gestão das culturas e utilização de recursos.

Um dos principais focos deste projeto é a otimização do equilíbrio entre a recolha de dados, a sua transmissão e o consumo de energia. Dado que estes dispositivos são frequentemente implementados em ambientes remotos e com recursos limitados, a autonomia energética é uma consideração crítica. A TL.SENSE foi projetada para minimizar o consumo energético sem comprometer o seu desempenho, garantindo a sua operabilidade a longo prazo e reduzindo a necessidade de manutenção ou substituição frequente de baterias.

4.2 Análise de Requisitos de *Hardware*

A fase de análise de requisitos é crucial para garantir que o desenvolvimento do *hardware* atende às necessidades específicas do projeto e às condições em que o dispositivo será utilizado. Nesta secção serão apresentados os principais requisitos de *hardware* que nortearam o desenvolvimento da TL.SENSE, com foco em garantir a robustez, eficiência e adequação às aplicações de agricultura de precisão.

4.2.1 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais definem o que o *hardware* deve ser capaz de realizar, considerando as funcionalidades necessárias para atingir os objetivos do projeto. No caso da TL.SENSE, os principais requisitos funcionais são:

- **Aquisição de Dados Multi-sensor:** o dispositivo deve ser capaz de adquirir dados de diferentes tipos de sensores, como por exemplo, temperatura, humidade, radiação, pressão, e humidade do solo, onde cada um pode comunicar utilizando protocolos distintos, tais como I2C, UART, sinal analógico ou digital, entre outros. Deve, ainda, estar preparado para funcionar com diferentes níveis de tensão, adaptando a diferentes sensores.
- **Comunicação de Longo Alcance:** deve haver um sistema de comunicação capaz de transmitir os dados recolhidos para um servidor central ou *gateway*, utilizando tecnologia LoRa para cobrir longas distâncias, centenas de metros ou até alguns quilómetros, em áreas rurais.
- **Gestão Energética Eficiente:** o *hardware* deve ser projetado para maximizar a autonomia energética, durando, pelo menos um ciclo vegetativo, e otimizar o consumo de todos os componentes.

- **Interface de Programação e Depuração:** o dispositivo deve incluir interfaces que permitam a programação, atualização e depuração do sistema de forma prática e eficiente.

4.2.2 Requisitos de Desempenho

Os requisitos de desempenho especificam as capacidades que o *hardware* deve ter para operar eficientemente dentro dos parâmetros estabelecidos. Para a TL.SENSE, os principais requisitos de desempenho incluem:

- **Baixo Consumo de Energia:** o dispositivo deve operar com um consumo de energia mínimo, idealmente permitindo pelo menos um ciclo vegetativo da cultura em questão, meio ano em alguns casos.
- **Grande Precisão na Aquisição dos Dados dos Sensores:** as leituras feitas aos sensores utilizados devem fornecer medições precisas e confiáveis, com uma margem de erro mínima, para garantir a qualidade dos dados adquiridos e sua utilidade para a agricultura de precisão.
- **Conectividade Resiliente:** a comunicação deve ser confiável, capaz de manter a conectividade mesmo em condições de sinal fraco ou interferência, com uma taxa mínima de perda de pacotes.
- **Tempo de Resposta Rápido:** o sistema deve ser capaz de responder rapidamente a mudanças nas condições ambientais, com tempos de latência baixos para garantir a relevância dos dados em tempo real.

4.2.3 Recomendações e Cuidados

No processo de desenvolvimento e desenho de uma PCB, existem alguns cuidados e recomendações que devem ser tidos em consideração para o seu correto funcionamento, entre os quais:

- A pista da antena, pista que liga o pino do microcontrolador até ao conector da antena, deve ser o mais em linha reta possível, e com uma impedância controlada a 50 Ohm. Para garantir essa impedância pode ser utilizada, por exemplo, a calculadora *online* da JLCPCB¹, onde são introduzidas informações como a espessura da PCB, o número de camadas, a impedância desejada, entre outras. Esta também ser isolada a todo o seu redor por um plano de massa e não deve ter nenhuma pista, quer de sinal como de potência, a passar por baixo, de forma a evitar, ao máximo, quaisquer tipos de interferências ou ruídos.

¹<https://jlcpcb.com/pcb-impedance-calculator>

- Na escolha da antena, deve ser escolhida uma antena que possua certas características: leque de frequências entre os 824 e os 928 MHz, uma impedância nominal de 50 Ohm e um ganho máximo de 2 dBi.
- As pistas de sinal devem estar isoladas, com planos de massa, entre elas e entre as pistas de potência.

4.3 Diagrama de Arquitetura de *Hardware*

Antes de começar o desenvolvimento do *hardware* e desenhar o seu esquema elétrico, foi necessário idealizar uma arquitetura de alto nível de todos os componentes necessários para o correto funcionamento da TL.SENSE. Assim, na Figura 4.1 pode-se observar o diagrama idealizado, onde estão representados todos os componentes essenciais. Na seção seguinte são apresentadas as justificações para a escolha destes componentes, quais os circuitos integrados escolhidos para serem implementados e respectivas ligações elétricas.

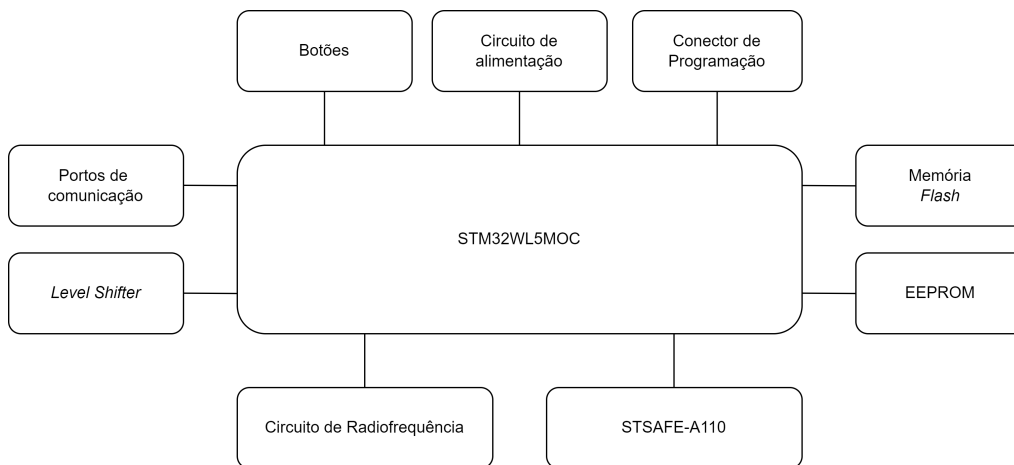


Figura 4.1: Diagrama de alto nível da arquitetura do sistema

4.4 Implementação de *Hardware*

Para implementar a arquitetura e desenvolver o esquema elétrico, foi utilizado o *software* EasyEDA [20] por ser uma solução gratuita com ferramentas de colaboração *online*. O EasyEDA permite a criação de esquemas elétricos, placas de circuito impresso, e apresenta a possibilidade de visualização 3D das placas desenvolvidas.

4.4.1 Microcontrolador

Características como a frequência de transmissão, tensão de alimentação, consumo energético nos momentos de transmissão (tanto *Low-Power* como *High-Power*) e de recepção, bem como em modo *Sleep*, entre outras, foram definidas como critérios de escolha no momento da decisão de qual o módulo LoRa e/ou microcontrolador a utilizar.

Como ponto de partida, foi estudado o esquemático da placa de expansão B-WL5M-SUBG1 [21], desenvolvida pela STMicroelectronics, placa que utiliza o mesmo microcontrolador que foi utilizado na TL.SENSE. Após o estudo da placa e da pesquisa de vários outros módulos LoRa, tais como o RN2483 [22], Semtech SX1276 [23], Semtech SX1262 [24], e alguns SoC, como o RAK4260 [25], RAK3172 [26], STM32WLE5CCU6 [27] e o STM32WL5MOC [28], foi feita uma análise comparativa resumida nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Tabela comparativa entre módulos LoRa

	RN2483	SX1276	SX1262
Frequência	EU433/EU868	EU433/EU868	EU433/EU868
Alimentação	3,3 V	3,3 V	3,3 V
Consumo Tx HP	n.a	120 mA	84 mA
Consumo Tx LP	38,9 mA*	29 mA	45 mA
Consumo Rx	14,22 mA	10,8 mA	4,6 mA
Consumo <i>Sleep</i>	1,6 uA	0,2 uA	0,16 uA
Periféricos	Interface SPI	Interface SPI	Interface SPI
Tipo	Módulo LoRa	Módulo LoRa	Módulo LoRa
Preço	16,18 €	9,13 €	7,43 €

*Consumo Tx 13,5 dBm MAX

Tabela 4.2: Tabela comparativa entre SoC LoRa

	RAK4260	RAK3172	STM32WLE5CCU6	STM32WL5MOC
Frequência	EU868	EU433/EU868	EU433/EU868	EU868
Alimentação	3,3 V	3,3 V	3,3 V	3,3 V
Consumo Tx HP	126,3 mA	87 mA	92 mA	103 mA
Consumo Tx LP	33,1 mA	n.a	23,5 mA	29 mA
Consumo Rx	13,6 mA	5,33 mA	4,82 mA	6,32 mA
Consumo <i>Sleep</i>	0,86 uA	1,69 uA	0,14 uA	0,14 uA
Periféricos	Vários**	Vários**	Vários**	Vários**
Tipo	SoC	SoC	SoC	SoC
Preço	12,8 €	6,02 €	8,50 €	16,03 €

***Analog-to-Digital Converter* (ADC) (12 bit), GPIO, SPI, I2C, USB, UART

Apesar do STM32WL5MOC apresentar algumas desvantagens perante as outras opções, tais como os consumos em modo de transmissão e recepção, possui características que o destacam. Integra um microcontrolador que possui dois *cores*, o que possibilita, por exemplo, dividir as tarefas em cada *core*. Por exemplo, um *core* fica responsável pela leitura e processamento dos dados dos sensores ligados e o outro

antena SMA-J-P-H-ST-EM1 desenvolvido pela SAMTEC, foi utilizado o conector 142-0701-801 da Johnson/Cinch Connectivity Solutions². Este conector possui as mesmas características recomendadas. A substituição deveu-se à existência em *stock* no laboratório TRIBE e de esta ser compatível com a espessura da TL.SENSE.

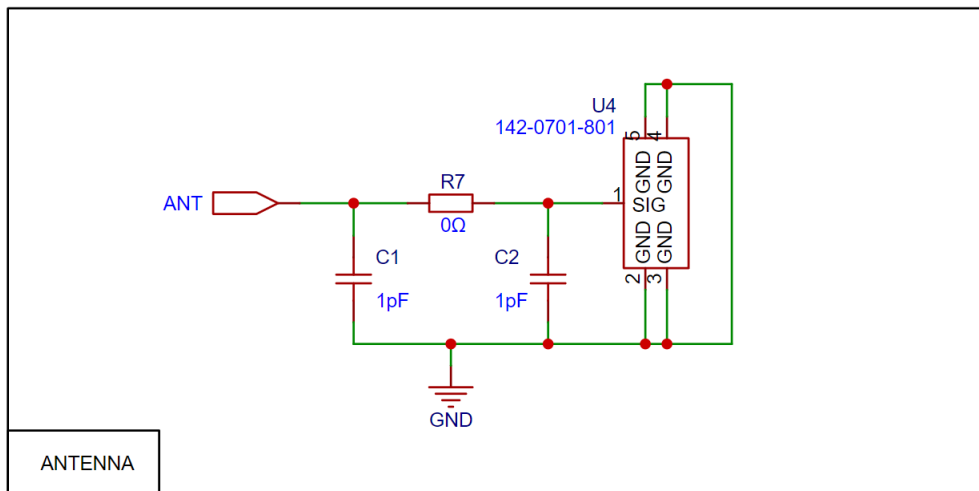


Figura 4.3: Circuito elétrico do bloco da antena

De forma a ser possível transitar entre os modos de transmissão em *High-output Power* ou *Low-output Power*, foi necessário implementar um sistema de DC *switches*, controlado por um GPIO do microcontrolador (SW_CTL). Na escolha do componente foi tida em consideração a recomendação feita pela STMicroelectronics no esquema da B-WL5M-SUBG1. Foi então utilizado o XS3A1T3157GS desenvolvido pela Nexperia³.

De forma a colocar o sistema em modo *High-output Power*, o pino VDDPA deve estar ligado a VDDRF e o pino VR_PA deve estar ligado a BIAS_HP. Por outro lado, para que o sistema funcione em *Low-output Power*, VDDPA deve estar ligado a VDDRF1V55 e VR_PA ligado a BIAS_LP. Para alternar entre cada um dos modos de funcionamento e, como já referido, um GPIO do microcontrolador, pino SW_CTL, é responsável por essa função. Se o pino assumir um nível lógico baixo, o sistema funciona em modo *High-output Power*. Pelo contrário, se assumir um nível lógico alto, funciona em *Low-output Power*.

Na Figura 4.4 está representado o circuito elétrico dos DC *switches*. Como salvaguarda, caso os *switches* falhassem ou o processo de soldadura falhasse devido à sua pequena dimensão, de aproximadamente 1,5 mm por 1 mm, foi também implementado a possibilidade de soldar resistências de zero Ohm, R3 a R6, para se

²<https://www.cinch.com/products/rf-microwave/connectors/142-0701-801>

³<https://www.nexperia.com/product/XS3A1T3157GS>

comportarem como *jumpers* e fazerem as ligações necessárias. Esta segunda solução apresenta a desvantagem de não ser possível transitar entre os dois modos de transmissão de forma automática.

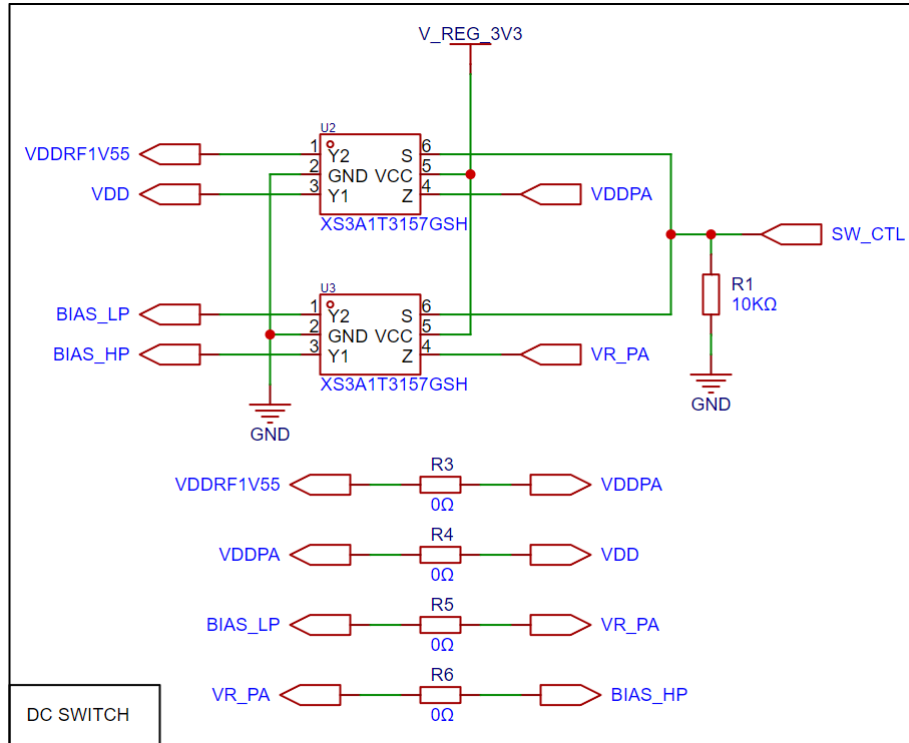


Figura 4.4: Circuito elétrico dos *switches*

4.4.3 Interface de Comunicação com Sensores Externos

Como já mencionado neste capítulo, um dos principais requisitos desta PCB é a aquisição de dados multi-sensor, sendo necessário que a PCB seja capaz de adquirir dados de diferentes sensores, sendo que estes podem comunicar leituras por I2C, UART, sinais analógicos, entre outros. Dessa forma, existem várias interfaces de comunicação com sensores externos. Dois portos para sensores analógicos, conectados a um ADC de 12 *bits* interno do microcontrolador, um porto I2C2, quatro portos I2C3 e um porto UART.

Portos ADC

De forma a ser possível a aquisição de dados de sensores analógicos, foram implementados dois portos ADC, como se ilustra na Figura 4.5. Cada um dos portos é constituído por um conector de 4 pinos, onde os pinos 1 e 2 são pinos de *Ground* (GND). O pino 3 é responsável pela leitura do sinal analógico. Neste pino estão ligadas 3 resistências que podem ser soldadas, ou não, e dimensionadas conforme o objetivo do porto, que pode ser adquirir dados de sensores com saída em corrente

ou em tensão. Por fim, o pino 4 é o pino responsável por fornecer a tensão de alimentação.

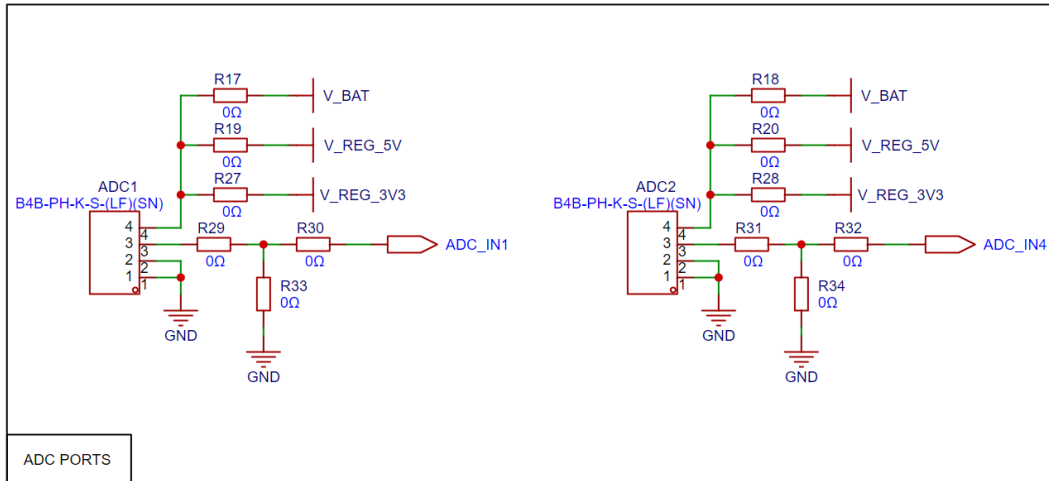


Figura 4.5: Esquema elétrico dos portos ADC

Caso o sensor tenha a saída em corrente, apenas as resistências R29 e R30 são soldadas, no caso do porto ADC1, e, caso necessário, as mesmas são dimensionadas para não exceder a corrente máxima de entrada no pino. Caso o sensor possua uma saída em tensão, todas as resistências são soldadas, onde R30 é uma resistência de zero Ohm, a funcionar como *jumper*, e R29 e R33 funcionam como um divisor de tensão. O pino 4 é o pino responsável por alimentar o sensor. Foi pensado e implementado para ser possível alimentar sensores com um dos três níveis de tensão distintos, tensão da bateria, tensão que alimenta a TL.SENSE, tensão regulada a 5 V ou então tensão regulada a 3,3 V. Para escolher a tensão a aplicar, deve ser soldada apenas uma das três resistências, R17, R19 ou R27.

Portos I2C

Um dos protocolos mais comuns na comunicação de sensores é o I2C, e dessa forma foram implementados cinco portos I2C, um porto I2C2 e quatro I2C3, sendo que nestes últimos existe a possibilidade de duas tensões de alimentação diferentes, 3,3 V ou 5 V. Na Figura 4.6 está representado o esquema elétrico do porto de I2C2. De forma a evitar sobrecargas ou possibilidade de erros na troca de mensagens, o barramento I2C2 apenas possui um porto para comunicação com sensores externos pois este é partilhado com a *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) e o STSAFE. Este porto alimenta também o sensor com uma tensão regulada de 3,3 V.

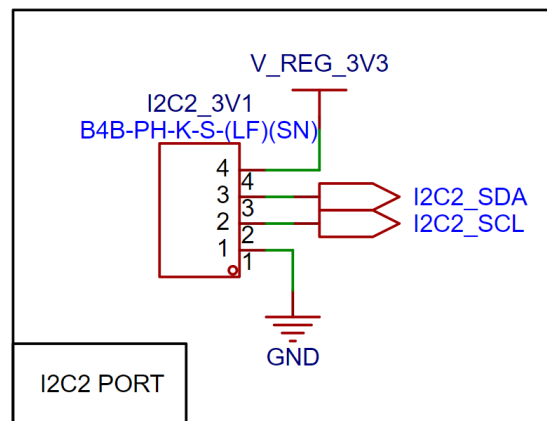


Figura 4.6: Esquema elétrico do porto I2C2

De forma a utilizar mais uma funcionalidade do microcontrolador, foram definidos e implementados quatro portos para o barramento de I2C3, sendo estes divididos entre dois portos com tensões de alimentação a 3,3 V, Figura 4.7, e dois portos a 5 V, Figura 4.8.

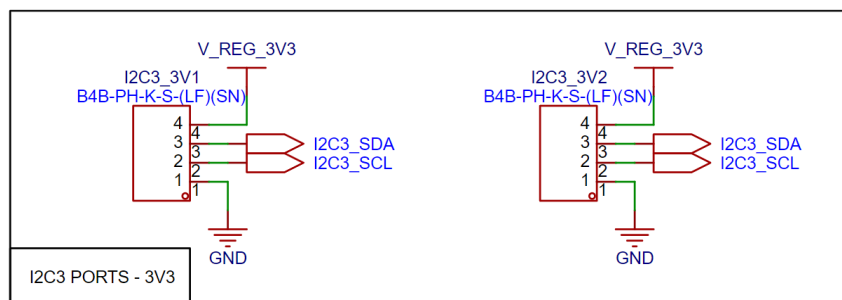


Figura 4.7: Esquema elétrico do porto I2C3 a 3,3 V

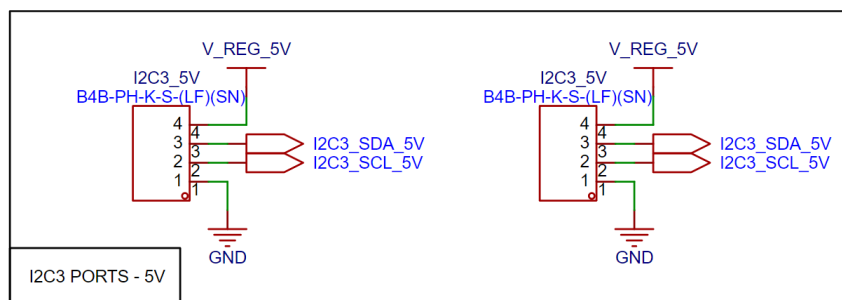


Figura 4.8: Esquema elétrico do porto I2C3 a 5 V

De salientar que nos portos I2C3 a 5 V, os pinos 2 e 3, *Serial Clock Line* (SCL) e *Serial Data Line* (SDA) respetivamente, não estão ligados diretamente ao barramento de I2C3, uma vez que este funciona à mesma tensão que o microcontrolador, ou seja, 3,3 V, mas sim a um *level shifter*. Mais à frente será introduzido e explicado como é utilizado de forma a possível comunicar com um barramento que possui

sinais lógicos a uma tensão diferente.

Na Figura 4.9 pode-se verificar que foram implementadas resistências de *pull-up* em ambos os barramentos I2C, através das resistências R21 a R26. Estas resistências desempenham um papel importante e essencial para o correto funcionamento do barramento. Ambas as linhas SDA e SCL são linhas em coletor aberto, ou seja, os dispositivos ligados ao barramento conseguem impor um nível lógico baixo, 0 V, porém não conseguem voltar a impor um nível lógico alto, neste caso 3,3 V. Para isso é necessário um circuito externo para o fazer, as resistências de *pull-up*. Quando a linha está em baixo e o dispositivo deixa de impor esse valor, as resistências voltam a colocar a linha com o nível lógico alto. Caso contrário, as linhas poderiam assumir valores flutuantes, os quais poderiam originar uma comunicação incorreta ou até impossibilitar a mesma.

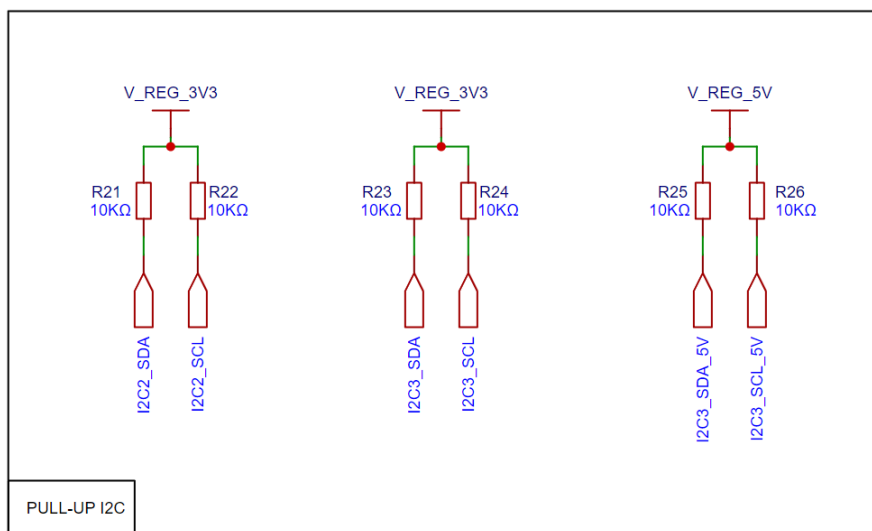


Figura 4.9: Esquema elétrico dos *pull-ups* dos barramentos I2C

É necessário dimensionar as mesmas conforme a necessidade do sistema, tendo em consideração a velocidade de comunicação e o consumo elétrico. Caso as resistências possuam valores elevados, podem fazer com que a transição entre os níveis lógicos baixo e alto seja realizada de forma lenta, diminuindo a velocidade de comunicação. Por outro lado, se forem utilizados valores baixos, o consumo de corrente elétrica pode ser elevado, originando também numa falha na comunicação. Geralmente são utilizados valores entre 1 kOhm e 10 kOhm. Neste caso, como a velocidade de comunicação e aquisição de dados não é crítica, foram implementadas resistências de *pull-up* de 10 kOhm.

Porto UART

Por fim, foi também idealizado um porto para sensores que comuniquem de forma série, por UART, como se mostra na Figura 4.10. Tal como o barramento I2C3, que

funciona a 5 V, também este porto funciona a uma tensão de 5 V. O que significa que as linhas de sinal estão referenciadas a 5 V a quando nível lógico alto. Porém, como o microcontrolador apenas permite tensões de entrada até 3,3 V, também este porto tem de passar pelo *level shifter*. Este porto possui, ainda, um segundo propósito, a sua utilização durante a programação da TL.SENSE como forma de depuração.

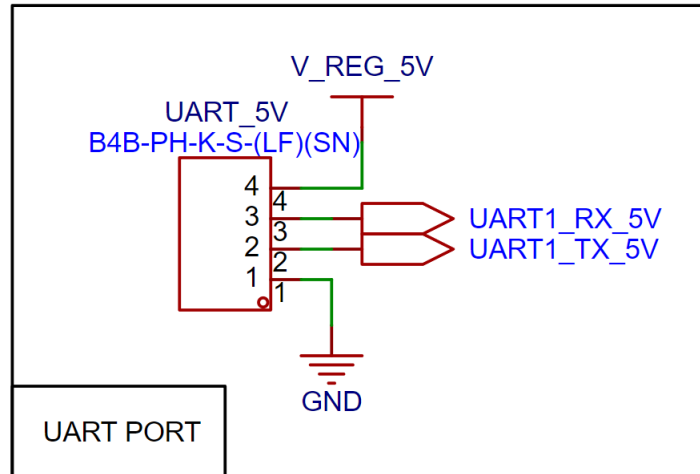


Figura 4.10: Esquema elétrico do porto UART

Level Shifter

Uma vez que o microcontrolador comunica a uma tensão lógica de 3,3 V e existem portos onde a comunicação é feita a uma tensão lógica de 5 V, foi necessário implementar um dispositivo que faça a tradução e a ligação entre eles. Dessa forma, o TXS0104ED, desenvolvido pela Texas Instruments⁴, foi escolhido por permitir uma tradução bidirecional, possuir 4 canais e um consumo baixo, na ordem dos 2 uA, requisito essencial na elaboração desta placa.

Quando dispositivos com diferentes níveis lógicos comunicam diretamente, o dispositivo de menor tensão pode não reconhecer corretamente os sinais provenientes do dispositivo de maior tensão, ou pode até ser danificado pelos níveis de tensão mais altos. Pelo contrário, o dispositivo de maior tensão pode não reconhecer como nível lógico alto a tensão utilizada pelo dispositivo de menor tensão. O TXS0104ED, representado na Figura 4.11, foi implementado para resolver este problema, permitindo a comunicação segura entre dispositivos que operam em diferentes tensões lógicas. Faz isso traduzindo os níveis lógicos entre dois níveis de tensão, chamados de VCCA e VCCB, que podem ser, neste caso, 3,3 V e 5 V. VCCA corresponde à tensão à qual o microcontrolador comunica e VCCB à tensão a que os dispositivos comunicam. Um requisito deste integrado é que a tensão VCCB tem de ser, sempre,

⁴https://www.ti.com/product/TXS0104E/part-details/TXS0104EDkeyMatch=TXS0104ED&tisearch=universal_search&usecase=OPN

superior a VCCA. Um outro requisito para o funcionamento do *level shifter* é que o pino 8, de *output enable* (OE), seja referenciado a VCCA.

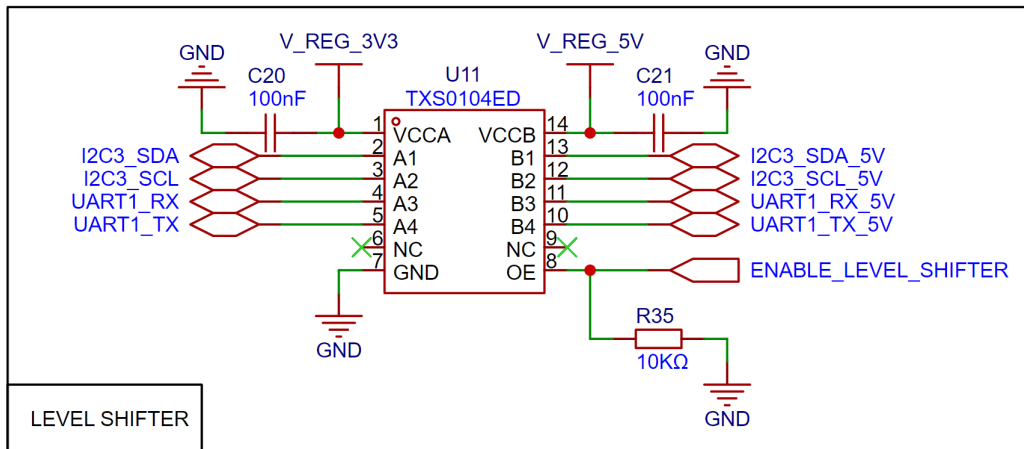


Figura 4.11: Esquema elétrico do *level shifter*

Para ser possível ativar o *level shifter* apenas quando necessário, de forma a reduzir o consumo total da placa, este é controlado através de um pino de GPIO, *ENABLE_LEVEL_SHIFTER*, que fica a nível lógico alto, 3,3 V, quando é necessário ativar o *level shifter*. Caso não seja necessário, a resistência de *pull-down* R35 fixa a tensão a 0 V, desativando assim o integrado.

4.4.4 STSAFE-A110

O STSAFE-A110 é uma solução de segurança desenvolvida pela STMicroelectronics⁵, concebida para fornecer uma forte proteção criptográfica para uma vasta gama de aplicações. É um circuito integrado que oferece características de segurança robustas, incluindo autenticação, armazenamento seguro de dados e proteção de chaves criptográficas [29]. O STSAFE-A110 é capaz de fornecer autenticação mútua entre dispositivos, o que garante que ambos os intervenientes possam verificar a identidade um do outro. Isto é fundamental em aplicações em que é necessária uma comunicação encriptada para integridade dos dados. Está otimizado para um baixo consumo de energia, o que o torna adequado para sistemas dimensionados para alta eficiência energética, como é o caso da TL.SENSE.

De forma a ativar o integrado apenas quando necessário, evitando assim consumos desnecessários, a alimentação do STSAFE-A110 é controlada por um GPIO do microcontrolador. Porém, este integrado pode consumir até 21 mA no arranque, uma corrente que ultrapassa a corrente máxima de saída do microcontrolador. Foi então necessário implementar uma forma de alimentar o integrado. Na Figura 4.12 pode-se verificar que foi utilizado um *Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET) para realizar esta tarefa, controlado pelo pino PB8_VDD_STSAFE.

⁵<https://www.st.com/en/secure-mcus/stsafe-a110.html#overview>

Foi dimensionado um divisor de tensão para colocar 1 V na *gate* do MOSFET, de forma a que este conduza e o pino VDD_STSAFE tenha a tensão de 3,3 V. Quando não é necessário que o integrado esteja a funcionar, a resistência R12 funciona como *pull-down*, impondo 0 V no pino, de forma a que não haja tensões flutuantes. A comunicação entre o STSAFE e o microcontrolador é feita através do barramento I2C2.

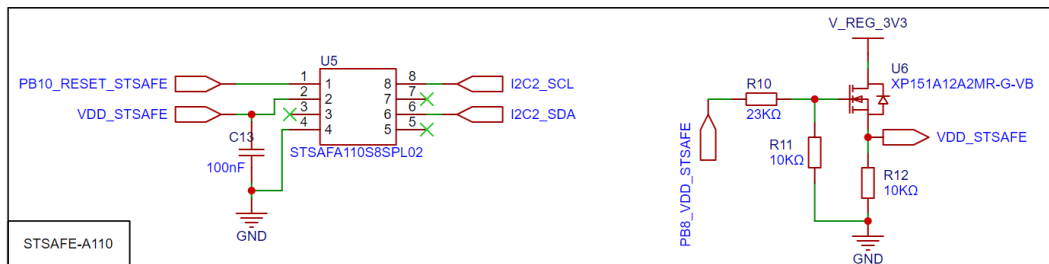


Figura 4.12: Esquema elétrico do STSAFE-A110 e correspondente circuito de alimentação

4.4.5 EEPROM

A EEPROM é um tipo de memória não volátil utilizada em sistemas eletrónicos para armazenar dados de forma persistente, mesmo quando o dispositivo está desligado. Diferente de outros tipos de memória, como a memória RAM, a EEPROM retém os dados armazenados mesmo quando não há energia, o que a torna ideal para armazenar configurações, parâmetros, *logs*, e outros dados que têm de ser mantidos entre reinicializações do sistema, ou por segurança quando o sistema, por algum motivo, desliga. Como recomendado na PCB B-WL5M-SUBG1, a EEPROM escolhida e implementada foi a M24256-DFMC6TG, desenvolvida pela STMicroelectronics⁶, possuindo uma capacidade de armazenamento de 256 Kbits, ou 32 Kbytes, e um consumo na ordem dos 2 uA enquanto está em modo *standby* à espera de comandos [30]. A comunicação, leitura e escrita na EEPROM é feita pelo microcontrolador através do barramento I2C2. Na Figura 4.13 pode-se verificar o esquema elétrico correspondente ao circuito da EEPROM.

⁶<https://www.st.com/en/memories/m24256-df.html>

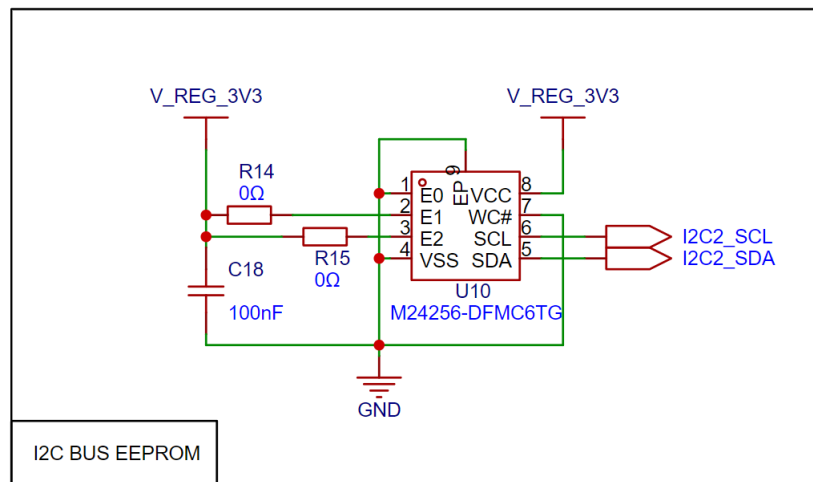
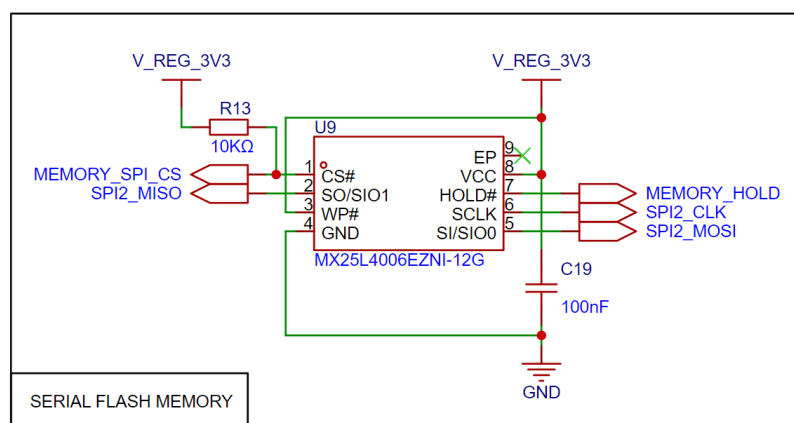


Figura 4.13: Esquema elétrico do circuito da EEPROM

4.4.6 Memória *Flash*

Tal como a EEPROM, a memória *flash* é uma memória não volátil capaz de armazenar dados mesmo quando o sistema não está alimentado. A sua ligação ao microcontrolador é feita através do protocolo SPI. Neste caso concreto, foi implementada a memória MX25L4006EZNI-12G, desenvolvida pela Macronix, possuindo uma capacidade de armazenamento de 4 Mbits, ou 512 KBytes [31]. Em muitos aspetos, a memória *flash* é semelhante e tem o mesmo objetivo que a EEPROM, porém, devido à sua capacidade de armazenar mais memória, é, normalmente, utilizada para guardar o programa que irá correr no microcontrolador, otimizando a memória deste último. Na Figura 4.14 está representado o circuito elétrico relativamente à implementação da memória *flash*.

Figura 4.14: Circuito elétrico da memória *flash*

4.4.7 Conector de Programação

De forma a ser possível ligar a TL.SENSE ao computador com o objetivo de a programar e ser detetada pelo ambiente de programação integrado, *Integrated Development Environment* (IDE), proprietário da STMicroelectronics, o STM32CubeIDE⁷, foi necessário incorporar um conector. Devido ao requisito da PCB ter pequenas dimensões, foi decidido utilizar o mesmo conector que é utilizado na B-WL5M-SUBG1, um *header* de 14 pinos (duas filas de 7 pinos cada uma), representado na Figura 4.15. Todos os pinos do conector ligados ao microcontrolador têm a sua função, porém, para programar a PCB através do programador, neste caso o ST-LINK/V2⁸, também proprietário da STMicroelectronics, apenas são necessárias 5 ligações. As linhas de T_SWCLK e T_SWIO por onde passa a informação, o pino NRST para o IDE ter controlo sobre a *reset* da PCB durante a sua programação, o pino de *ground* para fazer corresponder o mesmo GND entre os dois dispositivos e o pino de V_REG_3V3 que informa o IDE que o microcontrolador está alimentado.

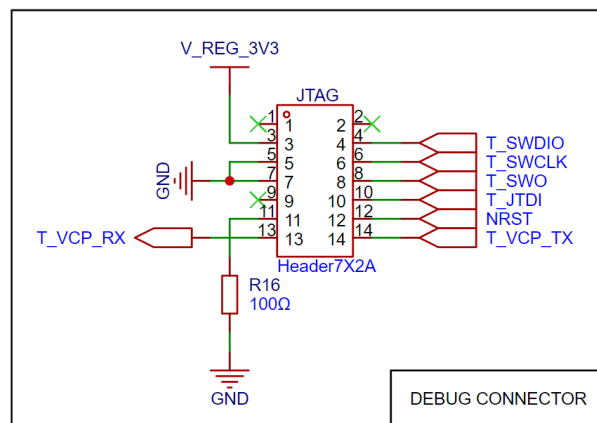


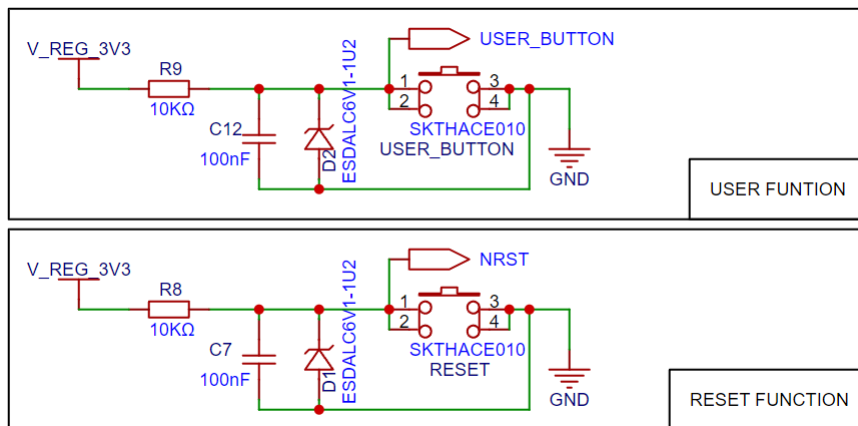
Figura 4.15: Esquema elétrico do conector para programação

4.4.8 Botões

De forma a ser possível reiniciar a placa após esta estar programada e desligada do programador, caso seja necessário, foi implementado um botão de *reset*. O circuito elétrico implementado, mostrado na Figura 4.16, foi baseado no mesmo circuito já implementado em vários outros protótipos desenvolvidos pelo laboratório TRIBE. Caso fosse necessário ter uma função que necessitasse de um *input* externo, foi, também, implementado um botão *user* para esse efeito. O seu circuito é uma réplica do outro botão já implementado. O botão de *reset* está ligado a um pino do microcontrolador dedicado a esta função, enquanto que o botão *user* está ligado a um GPIO.

⁷<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

⁸<https://www.st.com/en/development-tools/st-link-v2.html>

Figura 4.16: Esquema elétrico dos botões *user* e *reset*

4.4.9 Circuito de Alimentação

Por fim, foi necessário dimensionar e implementar todo o circuito de alimentação, tanto para o STM32, como para os periféricos. Devido ao objetivo e requisito de fornecer 5 V nos portos de comunicação, era necessário regular a tensão da bateria para 5 V, além dos 3,3 V que já iriam ser necessários para alimentação do microcontrolador, dos restantes circuitos integrados e para serem fornecidos, também, nos portos de comunicação.

Como a bateria ainda não tinha sido dimensionada nesta fase do projeto, e para ser possível um redimensionamento da bateria no futuro, caso necessário, um dos requisitos para a escolha dos reguladores de tensão era estes possuírem uma grande amplitude de tensões admitidas. Os reguladores escolhidos foram os reguladores da família AP7370, propriedade da Diodes Incorporated⁹. Estes reguladores possuem uma corrente máxima de saída de 300 mA, valor suficiente para suportar toda a alimentação da TL.SENSE e sensores externos, como se pode verificar nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3: Consumos dos circuitos integrados presentes na TL.SENSE

	DC Switch	Level Shifter	STSAFE	EEPROM	Mem. Flash	Total
Funcionamento	0,100 mA	0,144 mA	18,000 mA	2,000 mA	20,000 mA	40,244 mA
Standby	0,100 mA	n.a	0,245 mA	0,002 mA	0,015 mA	0,362 mA

⁹<https://www.diodes.com/part/view/AP7370>

Tabela 4.4: Consumos do microcontrolador nos diferentes modos de operação

	STM32WL5MOC
Modo Rx	6,960 mA
Modo Tx <i>Low-Power</i>	29,000 mA
Modo Tx <i>High-Power</i>	103,000 mA
Modo <i>Sleep</i>	0,414 mA

Pela análise destas tabelas, pode-se verificar que a corrente máxima no regulador para 3,3 V será de 143,244 mA (todos os circuitos integrados em funcionamento mais o microcontrolador em modo Tx *High-Power*), enquanto no regulador para 5 V será de 143,544 mA (somada à corrente consumida pelo regulador de 3,3 V). Com estes valores, ainda sobram cerca de 150 mA para consumo por parte dos sensores externos que possam ser ligados à TL.SENSE. É de esperar, com o microcontrolador em modo *sleep* e todos os outros circuitos integrados em *standby*, que o consumo mínimo da PCB ronde os 0,776 mA.

Após este dimensionamento procedeu-se, então, ao desenho do esquema elétrico relativo ao circuito de alimentação, que se mostra na Figura 4.17.

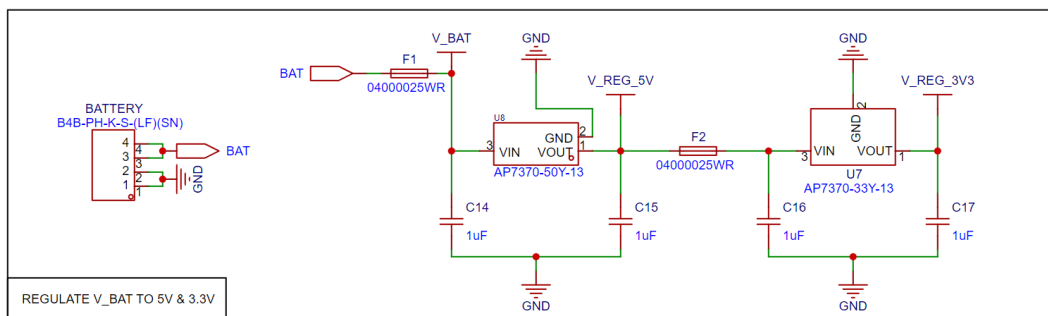


Figura 4.17: Esquema elétrico do circuito de alimentação

4.5 Prototipagem

Terminado o desenho do esquema elétrico da TL.SENSE, procedeu-se ao desenho da PCB, também este realizado no EasyEDA. Neste processo, existem alguns passos que foram cumpridos para o correto desenho de uma PCB:

- determinar a estrutura da PCB e, ao posicionar os componentes, orientar estes em função do circuito de radiofrequência, devido às suas necessidades de *layout*;
- isolar pistas de sinal de pistas de potência;
- ter em consideração as recomendações feitas pelos fabricantes de cada um dos componentes.

Tendo em conta estas considerações, e que a PCB deveria ser o mais pequena possível, foram incorporados todos os componentes num quadrado de 30 x 30 mm, ficando o microcontrolador no centro. Devido à quantidade de componentes e ligações a realizar, optou-se por dividir a placa em quatro camadas diferentes, característica que afetava ligeiramente o preço de fabrico. A TL.SENSE está dividida da seguinte forma:

- *Top Layer* - na primeira camada foi colocado o microcontrolador, o circuito de radiofrequência, a maior parte dos integrados, os portos de comunicação, os botões, algumas resistências e condensadores e as pistas de potência.
- *Inner Layers 1 e 2* - nestas duas camadas internas da placa, apenas existem pistas de sinal, isoladas entre elas e das pistas de potência.
- *Bottom Layer* - na última camada encontra-se o circuito de potência, o *level shifter*, dois portos de comunicação e a maior parte das resistências e condensadores.

Foram aplicadas algumas *copper regions*, ou seja, em vez de existir uma pista de cobre que liga dois pontos eletricamente, uma *copper region* é um plano todo feito de cobre que pode assumir qualquer ligação elétrica, definido no momento do desenho da PCB. Na TL.SENSE existem alguns, o mais comum é o que está configurado como GND. Em vez de se terem pistas a ligar todos os pontos de massa, existe este plano de cobre que está ligado a todos os pinos e faz a ligação entre eles. A principal vantagem do uso destes planos de cobre, especialmente com o GND, é a capacidade de isolar as pistas de sinal, reduzindo o ruído ao qual podem ser sujeitas.

Na Figura 4.18 é possível observar o plano de massa (plano vermelho) criado para fazer a ligação entre todos os pinos de GND existentes nos botões *reset* e *user* e no conector que liga a bateria à TL.SENSE. É possível, também, observar que a pista NRST, que vem do botão de *reset* e vai para um pino do microcontrolador, está isolada na maior parte do seu caminho.

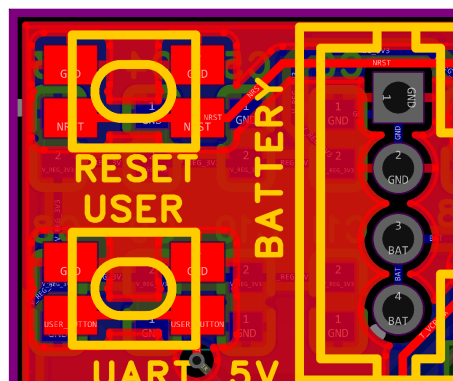


Figura 4.18: *Copper region* correspondente ao plano de massa

Na Figura 4.19 pode-se ver o posicionamento e roteamento finais da TL.SENSE, respeitando todas as regras e recomendações descritas na Subsecção 4.2.3.

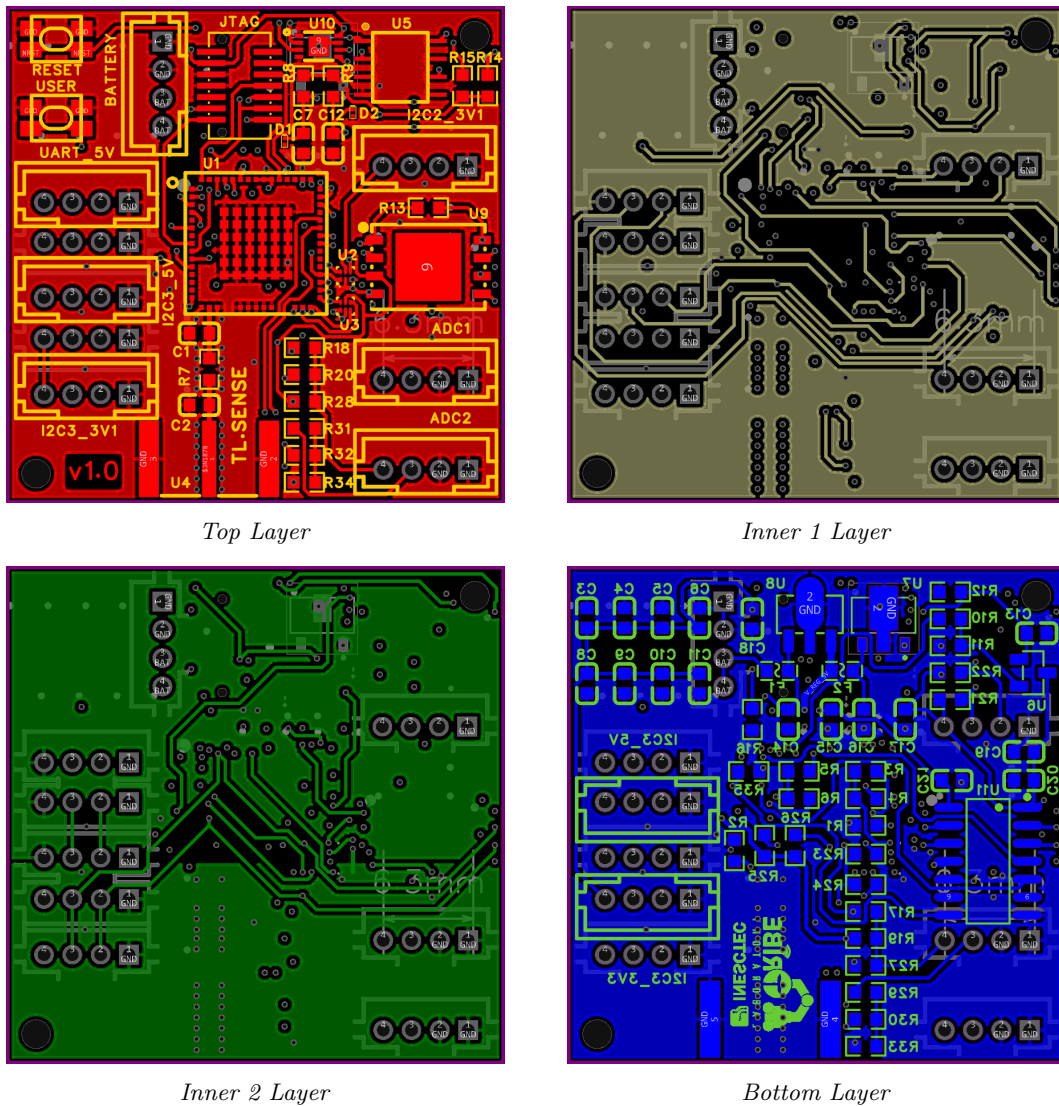


Figura 4.19: As quatro *layers* da TL.SENSE

A Figura 4.20 mostra a representação 3D da TL.SENSE. Alguns componentes não possuem a sua representação 3D na base de dados do EasyEDA, dessa forma não aparecem representados.

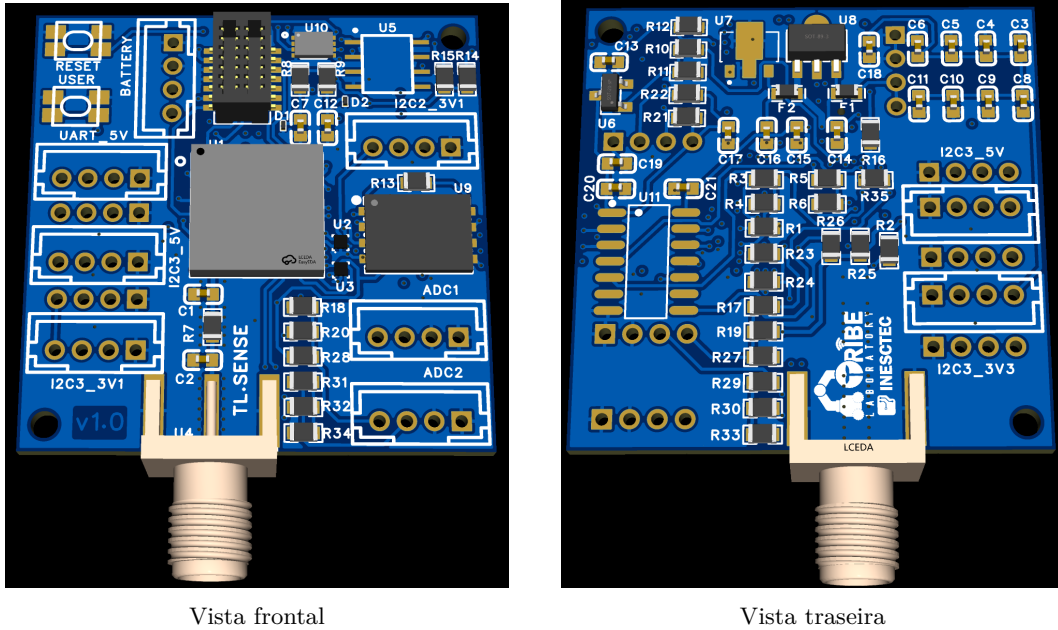


Figura 4.20: Visualização 3D da TL.SENSE

Atingido este passo, todos os ficheiros foram enviados para a empresa JLCPCB¹⁰, onde a PCB foi produzida. Na Figura 4.21 podem-se observar fotografias da PCB física da TL.SENSE. Após a receção da PCB foi então necessário soldar os componentes à placa de forma a proceder aos testes e à sua validação.

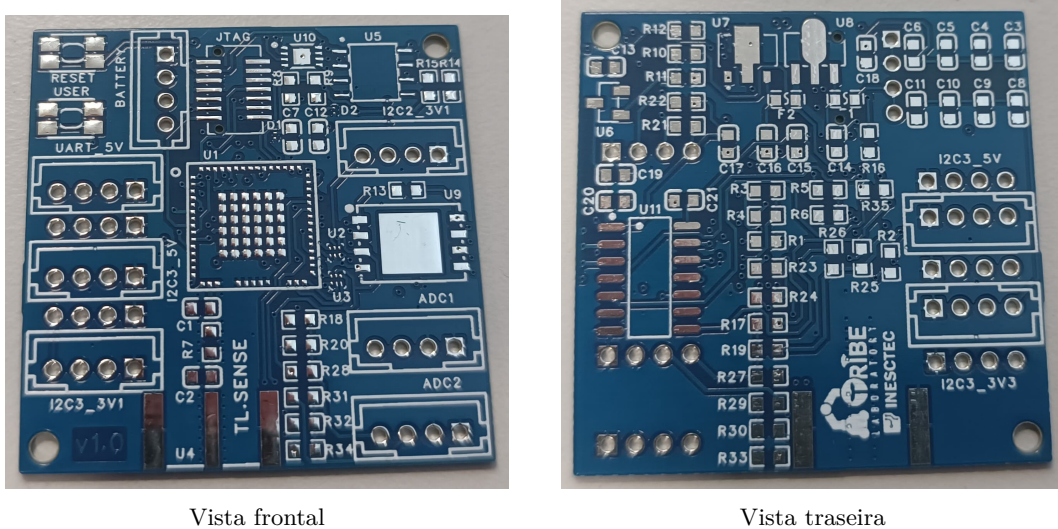
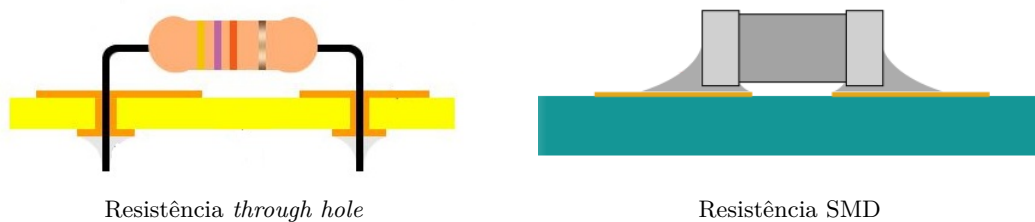


Figura 4.21: Fotografias da PCB TL.SENSE, fabricada pela JLCPCB

¹⁰<https://jlcpcb.com/>

4.6 Soldadura

Tendo a PCB projetada, dimensionada e fabricada, o passo seguinte foi a soldadura dos componentes na TL.SENSE. Foi utilizada a estação de soldadura já existente no laboratório TRIBE. A maior parte dos componentes são componentes *Surface-Mount Devices* (SMD) o que torna o processo um pouco mais complicado. Ao contrário dos componentes *through hole*, que têm furos onde encaixar os pernos e soldá-los na *pad* que se encontra do lado oposto da PCB, os SMD são soldados na mesma face onde são colocados. Isto permite soldar mais componentes em cada PCB, uma vez que é possível soldar componentes nos dois lados da placa. Na Figura 4.22 é perceptível a diferença entre os dois tipos de componentes.

Resistência *through hole*

Resistência SMD

Figura 4.22: Diferença do processo de soldadura entre componentes *through hole* e SMD

O microcontrolador também teve uma particularidade no seu processo de soldadura. Devido ao seu formato, *package*, os pinos ficam na parte de baixo do componente, tornando-os inacessíveis a um ferro de soldadura. Na Figura 4.23 pode-se observar a localização dos pinos.



Figura 4.23: Localização dos pinos no microcontrolador

De forma a ser possível a sua soldadura, teve de ser usada uma base própria onde a PCB é pousada e aquecida por toda de igual forma. Previamente, teve de ser colocada a pasta de solda nos pinos da PCB correspondentes ao microcontrolador, com auxílio e recurso a um *stencil*. Quando a PCB é enviada para produção, é possível, com um custo extra, o envio do *stencil*, que se trata de uma folha de alumínio muito fina que possui os recortes exatos dos *pads*. No momento da colocação da pasta de solda é apenas necessário alinhar a PCB com o *stencil* e, com recurso a uma espátula, aplicar a pasta. De seguida, retira-se o *stencil*, coloca-se o microcontrolador

por cima, tentando alinhar o melhor possível, e leva-se para a base de cama quente até que a pasta funda e solde.

Uma vez que este processo aquece a PCB toda, para não correr o risco de desoldar outros componentes, o microcontrolador é o primeiro a ser soldado. Tendo este soldado, procede-se ao processo de soldadura dos restantes componentes. A Figura 4.24 mostra uma TL.SENSE soldada com os componentes mínimos para a sua validação e respetivos testes.



Figura 4.24: TL.SENSE com os componentes mínimos soldados

4.7 Testes e Validação

Por fim, após ter a TL.SENSE toda soldada, procedeu-se aos seus testes e validação. O primeiro teste a ser realizado foi verificar se não existiam curto circuitos presentes, tanto resultantes da soldadura dos componentes, como de algum erro no processo de fabrico. De seguida, foi ligada a uma bateria de 5 V e foi verificada a tensão de saída de cada um dos reguladores e a tensão disponível nos portos de comunicação externa. Estando tudo a funcionar corretamente, o passo seguinte passou por ligar a TL.SENSE ao programador mencionado na Subsecção 4.4.7 e conectar o mesmo ao computador para confirmar que o IDE de programação detetava o microcontrolador.

Conseguindo, então, programar a TL.SENSE, foi ligado um sensor externo de temperatura e humidade, o HTU21D-F, da Adafruit¹¹, para servir como primeiro caso de estudo para validação, como se mostra na Figura 4.25. Este sensor comunica por I2C, a 3,3 V, e, dessa forma, foi ligado ao porto de I2C3 a 3,3 V. De forma a validar, também, o porto UART e o funcionamento do *level shifter*, a placa foi ligada por porta série ao computador de forma a visualizar as mensagens enviadas pelo programa.

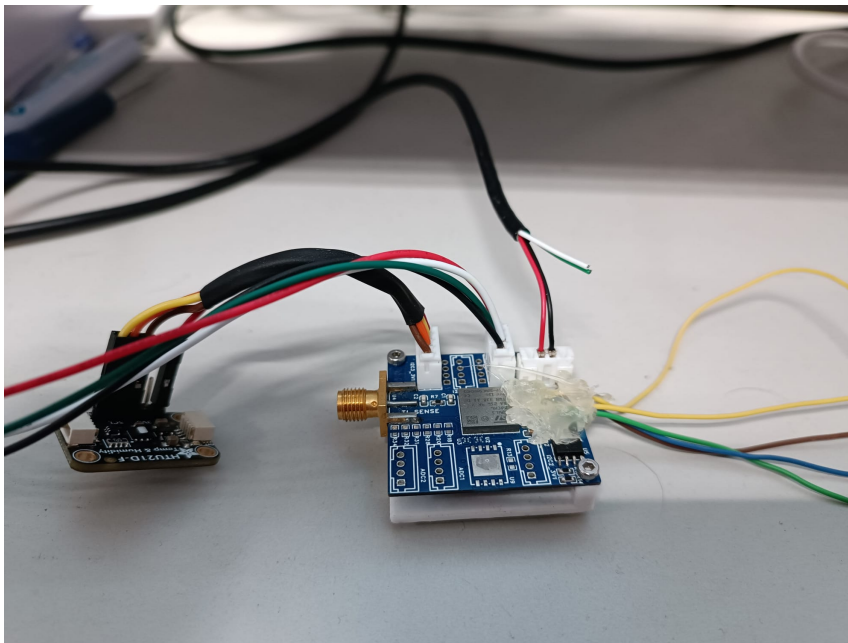


Figura 4.25: Primeiro teste de validação.

¹¹<https://www.adafruit.com/product/1899>

4.7.1 Validação do Circuito de Radiofrequência Através do Exemplo “Ping Pong”

De forma a validar por completo a implementação de *hardware*, apenas faltava validar a componente de radiofrequência. Para isso foi executado um exemplo de “Ping Pong”¹² disponibilizado em *open-source* no site da DigiKey.

Este exemplo explica como utilizar o *driver* de rádio Sub-GHz de baixo nível nos microcontroladores STM32WL, com foco na redução da complexidade e consumo de energia. Utilizando o protocolo LoRa, o exemplo demonstra a comunicação bidirecional entre dois dispositivos, através de radiofrequência. Num ciclo periódico, um dispositivo envia uma mensagem (“PING”) e o outro responde com um “PONG”. A implementação do *software* de teste pressupõe configuração automática do rádio LoRa, inicialização dos parâmetros de modulação, e alternância entre os modos de recepção e transmissão. Este exemplo é útil para testar a conexão e a estabilidade da comunicação entre dispositivos LoRa, ilustrando como funciona o protocolo. De forma a utilizar este exemplo, não foram necessárias nenhuma adaptação ao *software* disponibilizado.

Para realizar o teste e validação foram utilizadas duas PCB TL.SENSE. Na Figura 4.26 são mostradas as duas TL.SENSE, ambas com o mesmo *firmware*, a comunicar entre si.

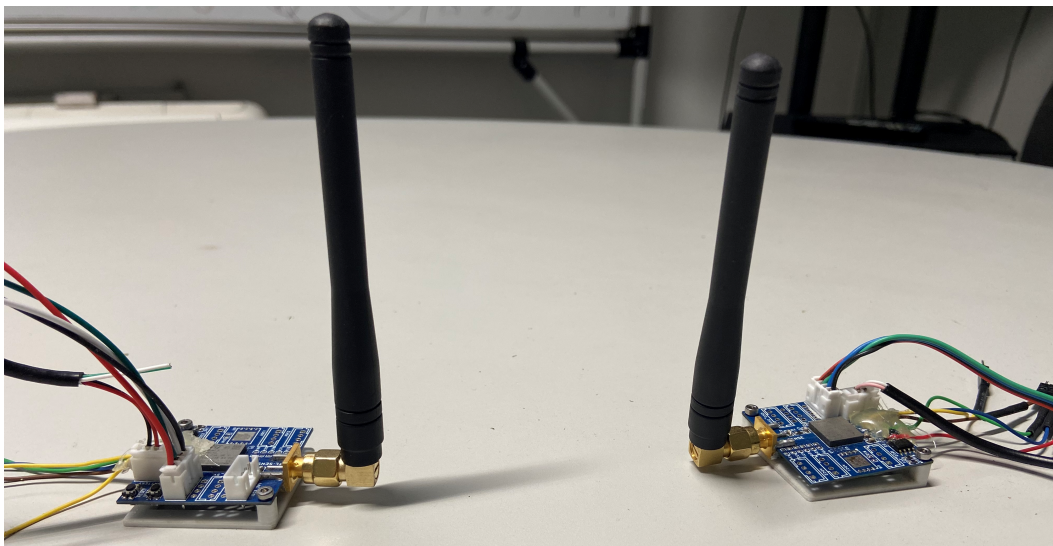


Figura 4.26: Fotografia de duas TL.SENSE

A comunicação pode ser observada através da Figura 4.27 onde é possível observar dois terminais série, onde num é possível verificar o envio da mensagem (“PING”) e no outro a sua recepção e respetiva resposta (“PONG”).

¹²<https://forum.digikey.com/t/using-the-low-level-sub-ghz-radio-driver-for-the-stm32wl-series/18253>

The image shows two side-by-side PuTTY terminal windows. The left window, titled 'COM5 - PuTTY', displays the output of a Master node. It shows a sequence of four 'PING' messages. Each message is followed by a series of status events: 'Master Tx start', 'Event TX Done', 'Master Rx start', 'Event RX Done', and 'RssiValue=-96 dBm, SnrValue=9 Hz'. The right window, titled 'COM6 - PuTTY', displays the output of a Slave node. It shows a sequence of four 'PONG' messages. Each message is followed by a series of status events: 'Event TX Done', 'Slave Rx start', 'Event RX Done', 'RssiValue=-81 dBm, SnrValue=9 Hz', 'Slave Tx start', 'Event TX Done', 'Slave Rx start', 'Event RX Done', and 'RssiValue=-81 dBm, SnrValue=5 Hz'. The windows are separated by a vertical line, and the text is displayed in a monospaced font on a black background.

```

COM5 - PuTTY
...PING
Master Tx start
Event TX Done
Master Rx start
Event RX Done
RssiValue=-96 dBm, SnrValue=9 Hz
-----
...PING
Master Tx start
Event TX Done
Master Rx start
Event RX Done
RssiValue=-96 dBm, SnrValue=5 Hz
-----
...PING
Master Tx start
Event TX Done
Master Rx start
Event RX Done
RssiValue=-95 dBm, SnrValue=3 Hz
-----
...PING
Master Tx start

COM6 - PuTTY
Event TX Done
Slave Rx start
Event RX Done
RssiValue=-81 dBm, SnrValue=9 Hz
-----
...PONG
Slave Tx start
Event TX Done
Slave Rx start
Event RX Done
RssiValue=-81 dBm, SnrValue=5 Hz
-----
...PONG
Slave Tx start
Event TX Done
Slave Rx start
Event RX Done
RssiValue=-81 dBm, SnrValue=9 Hz
-----
...PONG
Slave Tx start
Event TX Done
Slave Rx start

```

Envio da mensagem “PING”

Resposta com a mensagem “PONG”

Figura 4.27: Troca de mensagens entre os dois nós a executarem o exemplo “Ping Pong”.

Após os testes do primeiro caso de estudo, e dos testes da implementação do exemplo “Ping Pong” foi possível concluir que o funcionamento idealizado para a TL.SENSE foi cumprido.

Capítulo 5

Implementação de *Software*

Neste capítulo vai ser apresentada a arquitetura idealizada para o sistema, através de fluxogramas e de diagramas de sequência, que irá integrar duas sub-componentes que irão ser executadas nos *sensor nodes* e na *gateway*.

5.1 Arquitetura do Sistema

Tendo validado o circuito de radiofrequência para comunicação LoRa através da TL.SENSE, o passo seguinte foi idealizar e desenvolver a arquitetura de *software* para tornar a comunicação de mensagens entre os nós e a *gateway* robusta, modular e adaptativa. Em primeiro lugar, foi necessário definir a trama da mensagem a enviar e os parâmetros que a compõem. Começou-se por definir os ID, Figura 5.1, onde a *gateway* assume sempre o ID 0x01 e os *sensor nodes* podem assumir um ID entre 0x01 e 0xFE. O ID 0x00 está reservado para quando um nó se tenta ligar pela primeira vez a uma *gateway* e ainda não possui ID definido. Por fim, o ID 0xFF corresponde ao ID de *Acknowledge* (ACK).

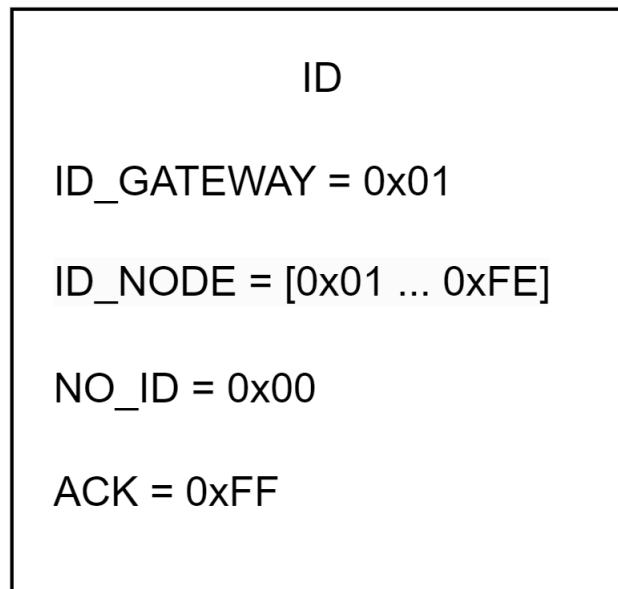


Figura 5.1: Sistema de ID implementado

Foi necessário definir, também, o parâmetro correspondente ao tipo de sensor que está ligado ao nó, Figura 5.2. Como ponto de partida foram definidos os seguintes valores para cada tipo de sensor:

- 0x00 para sensores de temperatura do ar;
- 0x01 para sensores de humidade do ar;
- 0x02 para sensores de temperatura e humidade do ar;
- 0x03 para sensores de radiação;
- 0x04 para sensores de temperatura do solo;
- 0x05 para sensores de humidade do solo.

A ordem da atribuição de cada tipo de sensor foi completamente aleatória, porém sequencial e a começar em 0x00, Figura 5.2. Esta informação é previamente configurada no *firmware* de cada módulo de sensorização (conjunto TL.SENSE + sensor), antes da sua implementação em contexto real, para que se torne possível transmitir a informação à *gateway* acerca do tipo de sensor presente e parâmetros esperados. Caso seja necessário, podem ser definidos novos valores para sensores que não estejam a ser contemplados.

Tipo de Sensor	
0x00 = Sensor de temperatura do ar	0x03 = Sensor de radiação
0x01 = Sensor de humidade do ar	0x04 = Sensor de temperatura do solo
0x02 = Sensor de temperatura e humidade do ar	0x05 = Sensor de humidade do solo

Figura 5.2: Codificação para cada tipo de sensor

Por fim, foram definidas as codificações para os pedidos de dados feitos pela *gateway*, Figura 5.3. Da mesma forma que na codificação do tipo de sensor, caso seja necessário, podem ser definidos novos códigos de pedido de dados para sensores que não estejam a ser contemplados.

PEDIDOS		
0x00 = Nada	0x03 = Temperatura e humidade do ar	0x06 = Humidade do solo
0x01 = Temperatura do ar	0x04 = Radiação	
0x02 = Humidade do ar	0x05 = Temperatura do solo	

Figura 5.3: Codificação para cada pedido de dados

5.1.1 *Sensor Node*

Cada *sensor node*, antes da sua implementação em campo, é programado e configurado com a codificação sobre os sensores que irá ter conectado e sobre a *gateway* à qual se irá ligar.

Na Figura 5.4 é possível observar o fluxograma completo da arquitetura do sistema idealizado para um *sensor node*. Cada um dos blocos, A, B e C, vão ser devidamente explicados.

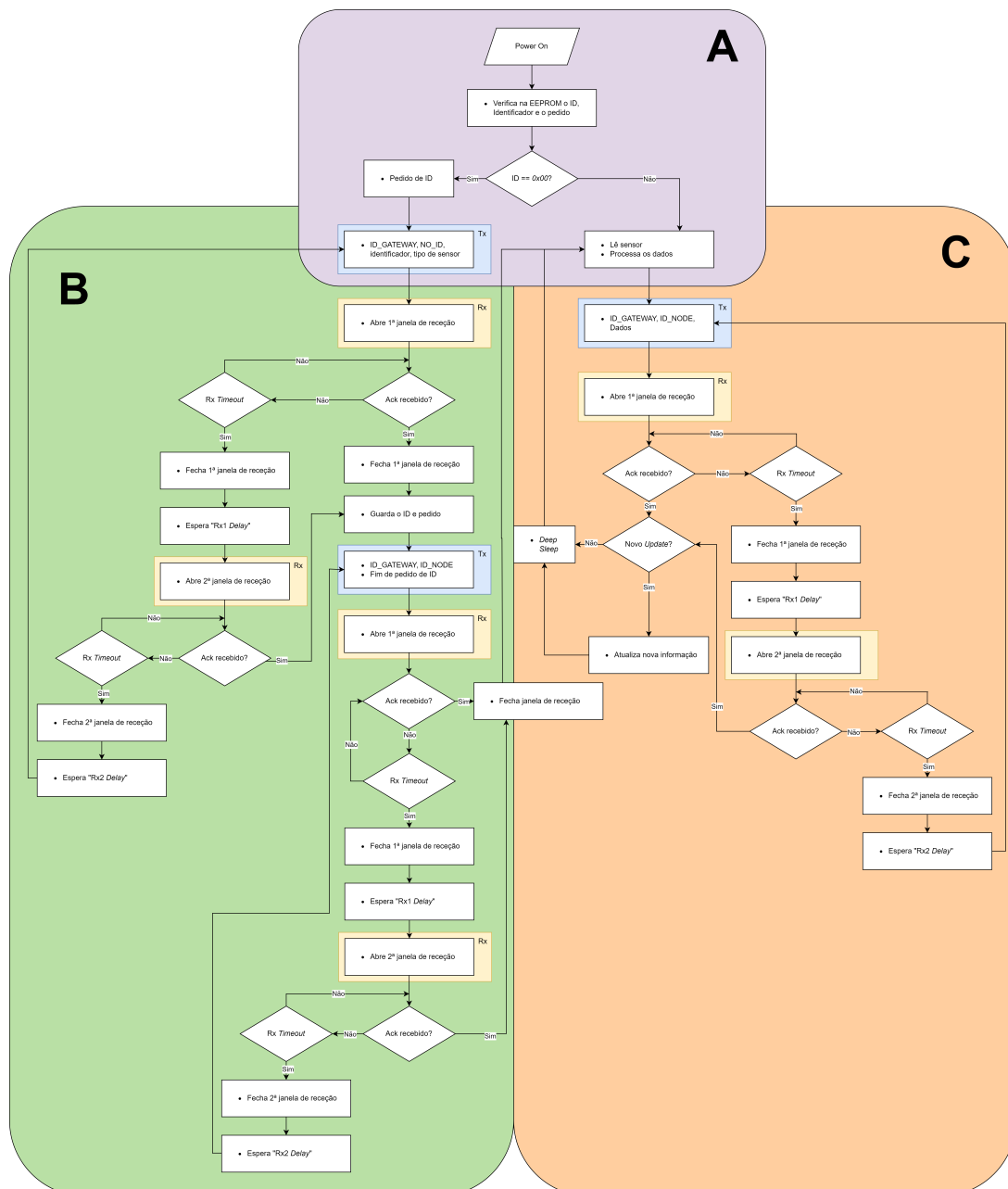


Figura 5.4: Fluxograma completo da arquitetura de sistema idealizada para um *Sensor Node*

Dessa forma, o seu funcionamento foi idealizado para ser o seguinte: o utilizador final, após colocar o dispositivo no local desejado para recolha de dados, irá ligar o mesmo. Este, por sua vez, após ligar, irá executar as suas funções de inicialização e verificar se na EEPROM já se encontra com algum ID atribuído. Caso não tenha, procede a realizar um pedido de atribuição de ID à *gateway*. Para esse efeito, envia uma mensagem LoRa contendo o ID da *gateway* à qual se está a tentar conectar, juntamente com um ID 0x00, um identificador e a codificação sobre o tipo de sensor que tem conectado, como se ilustra na Figura 5.5.

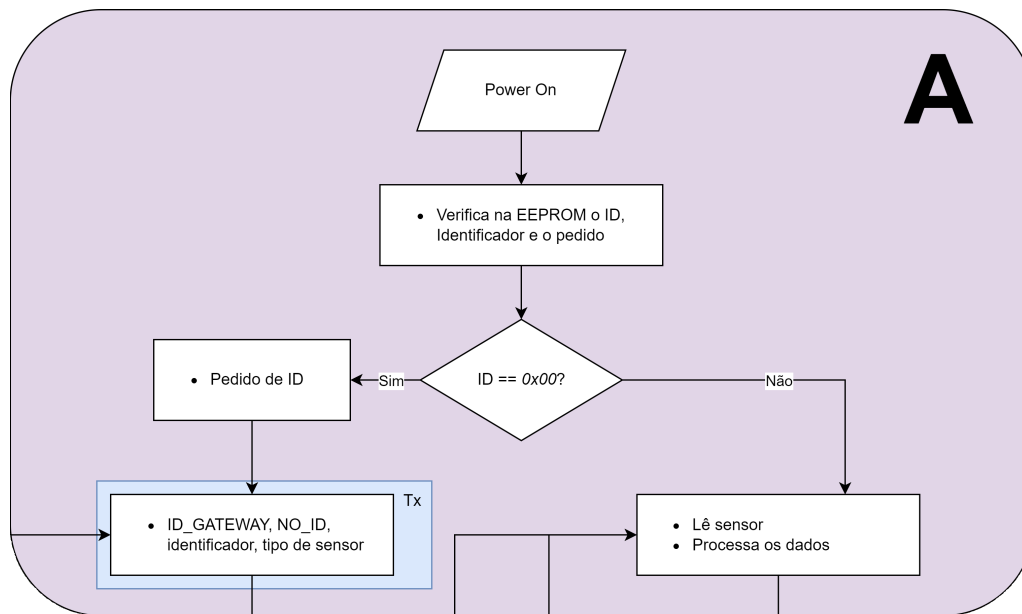


Figura 5.5: Parte A do fluxograma correspondente ao pedido de atribuição de ID por parte do *sensor node*

O identificador é um código de 2 *bytes*, gerado aleatoriamente quando o nó entra no processo de pedido de atribuição de ID. Este identificador tem como objetivo distinguir e identificar os diferentes *sensor nodes*, uma vez que ambos possuem ID 0x00 quando efetuam um pedido de atribuição de ID à *gateway*. Caso o identificador não existisse, a *gateway* iria responder para o ID 0x00 e ambos os *sensor nodes* ficavam com o mesmo ID. Desta forma, a *gateway* recebe o ID 0x00, juntamente com o identificador, e sabe que tem de responder para o ID 0x00 que possua esse mesmo identificador.

Após o envio do pedido de ID, o *sensor node* abre a primeira janela de receção e fica em espera por um ACK por parte da *gateway*, juntamente com o seu novo ID e informação sobre a frequência à qual deverá enviar dados. Fica à espera durante um tempo definido pelo protocolo LoRa e caso não receba resposta fecha a primeira janela e espera um *delay* também definido no protocolo. Após este tempo abre a segunda janela de receção e fica à espera. Novamente, ao fim de um tempo, *Rx Timeout*, caso não tenha recebido, fecha a janela e volta a enviar a mensagem de

pedido de ID. Este tempo *Rx Timeout* é igual para todos os casos e é definido pelo protocolo LoRa em si.

Tanto na primeira janela, como na segunda, se receber ACK por parte da *gateway* guarda as informações recebidas e envia uma nova mensagem com o ID atribuído de forma a confirmar a sua receção e que se encontra pronto para ler o sensor e enviar dados. De novo, volta a ficar a espera do ACK. Quando o receber, procede então para a leitura do sensor e aquisição de dados.

A Figura 5.6 mostra todo o processo de atribuição de ID, e como se comporta o sistema caso o *sensor node* não receba o ACK.

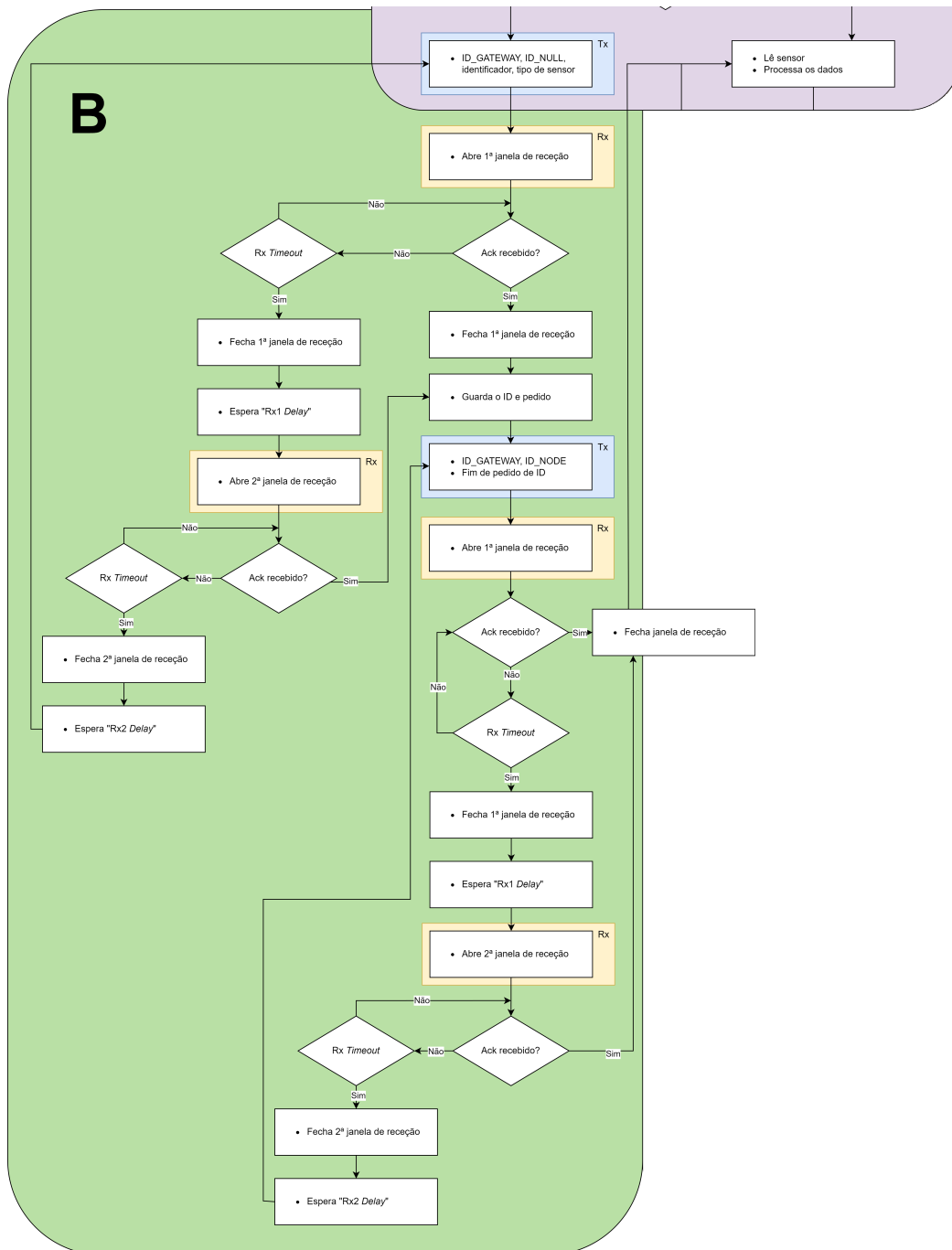


Figura 5.6: Parte B do fluxograma correspondente à atribuição do ID do *sensor node*

Uma vez realizada a aquisição e o processamento dos dados do sensor, é enviada uma mensagem para a *gateway* contendo o ID dela, o ID do nó e os dados do sensor. Após o envio da mensagem, é aberta uma nova janela de recepção e o *sensor*

node fica à espera de um ACK. De acordo com o protocolo LoRa, e sendo este nó um *end node class A*, as duas janelas de receção são, novamente, respeitadas e implementadas. Quando o *sensor node* receber um ACK por parte da *gateway* é realizada uma análise à mensagem recebida a verificar se existe alguma atualização nos parâmetros, como, por exemplo, na periodicidade das mensagens. Em caso afirmativo, essas alterações são guardadas e o sistema entra em modo de *sleep*, por um tempo igual à periodicidade recebida, até à próxima janela de receção. Se não houver, entra diretamente em modo *sleep*, de forma a otimizar o consumo energético. Na Figura 5.7 está representada a parte C do fluxograma que diz respeito ao envio de dados do sensor para a *gateway*.

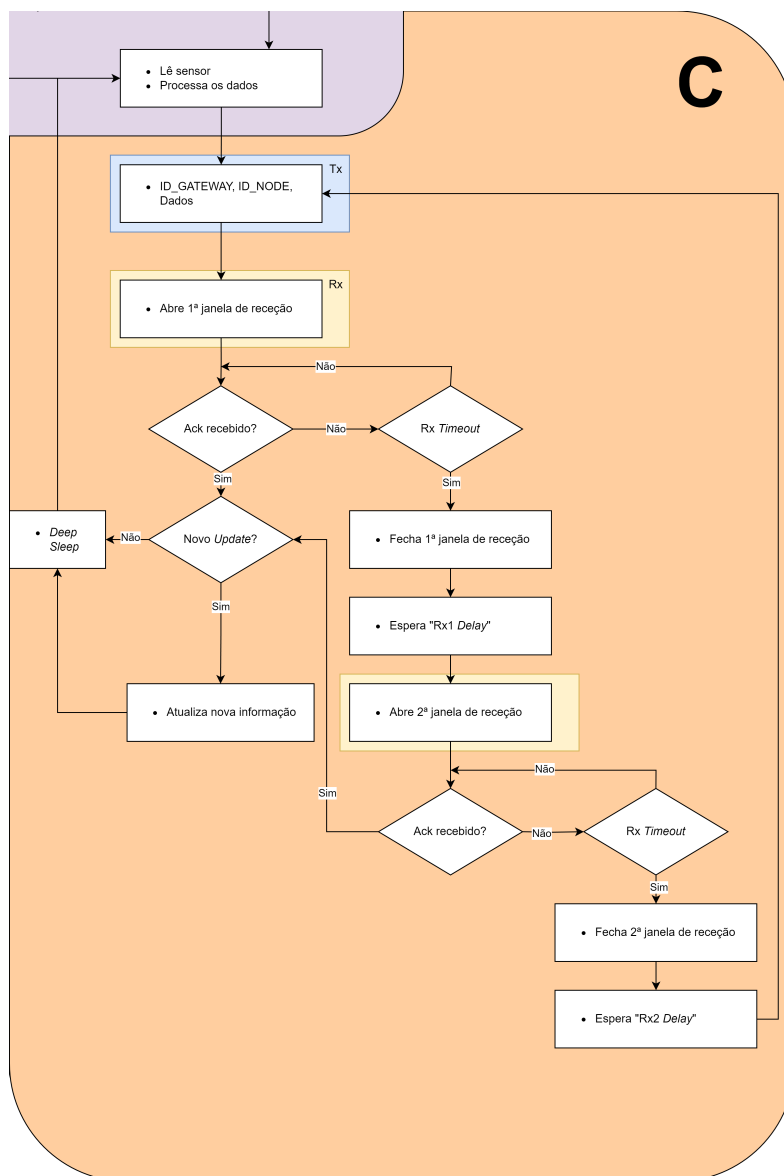


Figura 5.7: Parte C do fluxograma correspondente ao envio dos dados do *sensor node* para a *gateway*

Nas figuras seguintes é possível observar os diagramas de sequência relativos às trocas de mensagens nos processos de pedido de atribuição de ID, Figura 5.8, e envio de dados do sensor, Figura 5.9.

Na definição de cada mensagem, o número que aparece entre parênteses retos corresponde à posição que esse parâmetro ocupa. Por exemplo, [0] corresponde à 1ª posição, 1º *byte*, no *buffer* de mensagem a enviar.

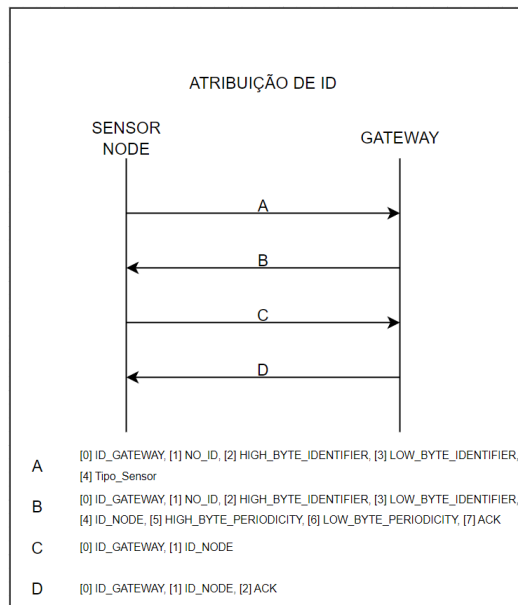


Figura 5.8: Diagrama de sequência de atribuição de ID

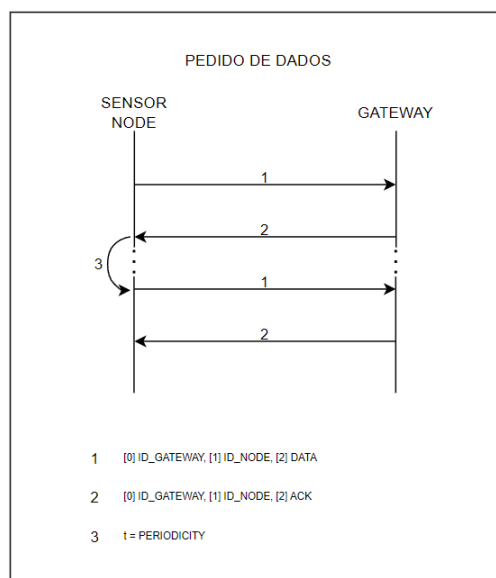


Figura 5.9: Diagrama de sequência de pedido de dados do sensor

5.1.2 Gateway

A *gateway* irá funcionar como um dispositivo classe C, ou seja, irá estar sempre à espera de novas mensagens provenientes dos *sensor nodes*. Na Figura 5.10 é possível observar o fluxograma completo da arquitetura do sistema idealizado para a *gateway*. Novamente, cada um dos blocos irá ser explicado de seguida.

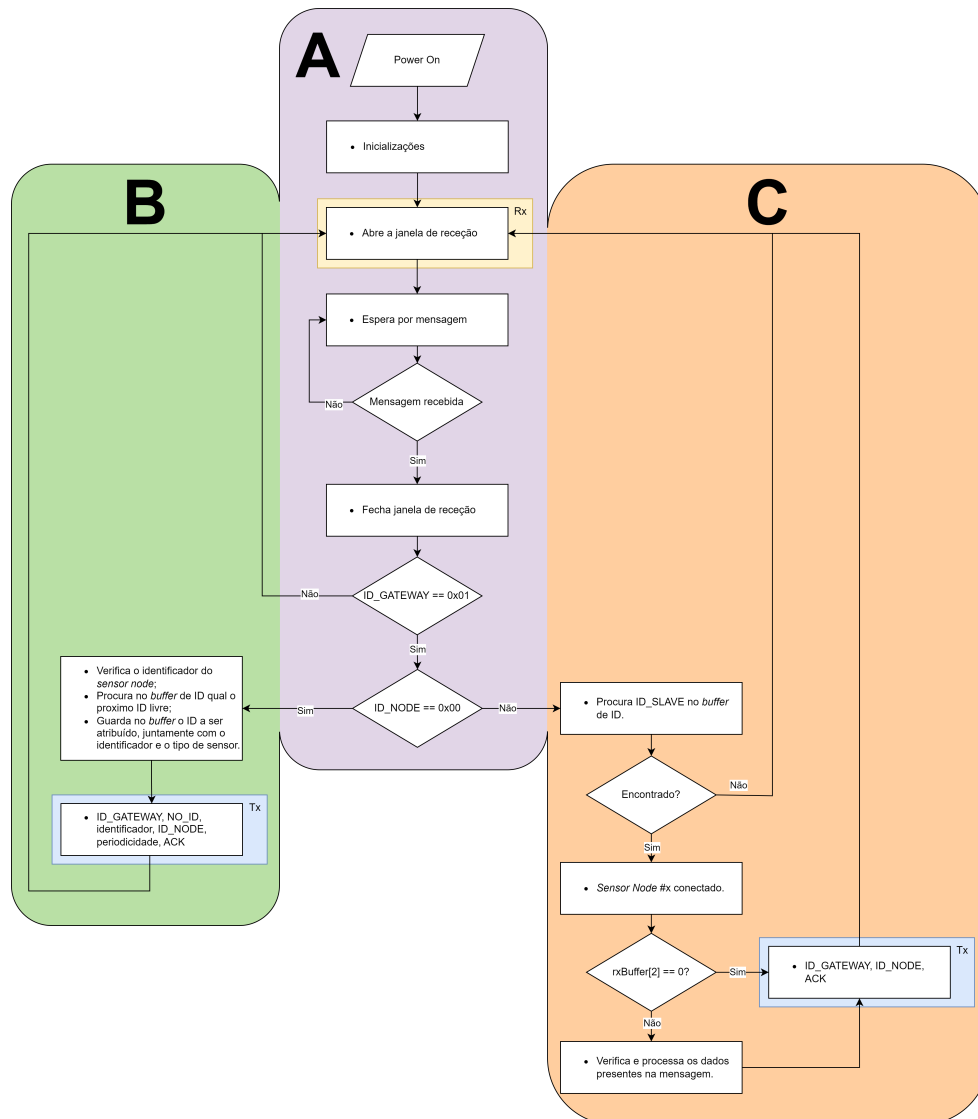


Figura 5.10: Fluxograma completo da arquitetura de sistema idealizada para a *gateway*

Quando a *gateway* se liga, executa as suas inicializações e abre a janela de receção, ficando então à espera de uma mensagem. Quando a receber, fecha a janela de receção e verifica se a mensagem recebida é para ela, contendo o seu ID, 0x01. Caso não seja, volta a abrir uma janela de receção, mas, por outro lado, se for, verifica se o ID do sensor node que se está a tentar contactar é 0x00, estando a pedir uma atribuição de ID, como se pode verificar na Figura 5.11.

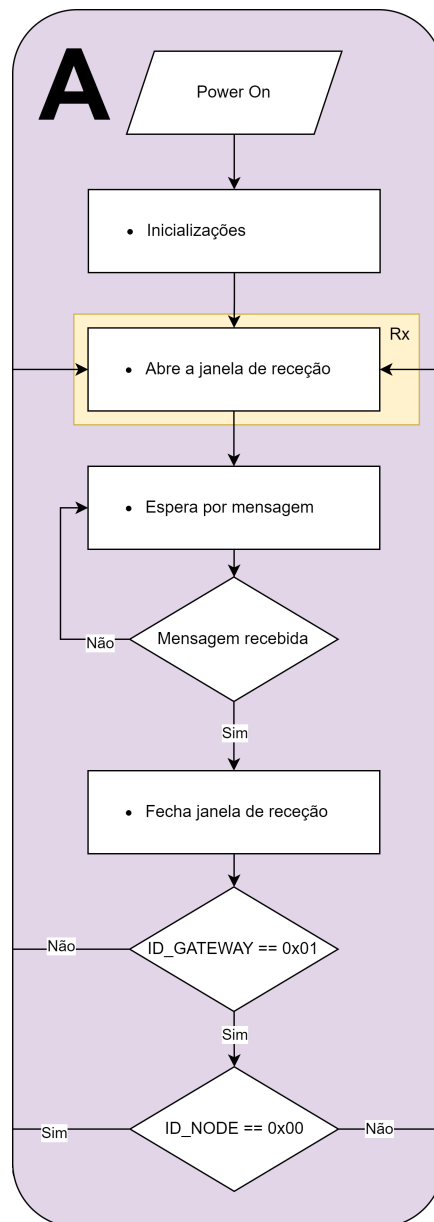


Figura 5.11: Parte A do fluxograma correspondente à recepção de mensagem e verificação de ID por parte da *gateway*

Caso o ID do nó seja 0x00, então inicia-se o processo de atribuição de ID. É lido o identificador do nó e o tipo de sensores que este possui conectados. De seguida, a *gateway* procura na memória qual o ID livre para ser atribuído. A esse ID é feito corresponder o identificador e a informação sobre o tipo de sensor do nó ao qual vai ser atribuído um novo ID. Para finalizar este processo, é então enviada uma mensagem contendo o ID da *gateway*, o ID 0x00, o identificador do nó ao qual vai ser atribuído um novo ID, o novo ID, a periodicidade sobre a qual tem de ser enviada a mensagem contendo os dados dos sensores e, por último, o ACK. Esta sequência pode ser observada na Figura 5.12.

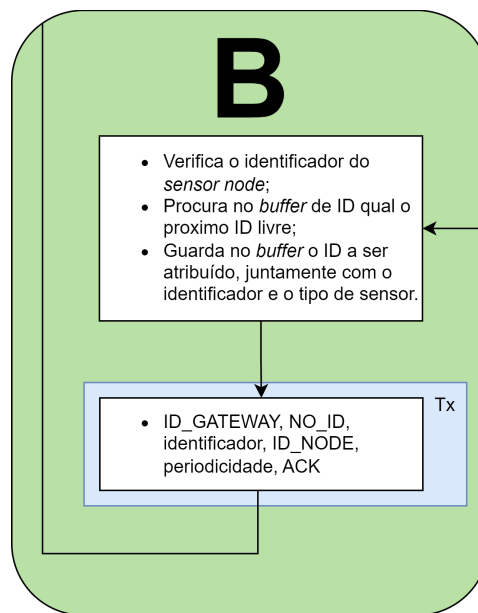


Figura 5.12: Parte B do fluxograma correspondente à atribuição de ID por parte da *gateway*

Tendo enviado esta mensagem, volta a abrir a janela de receção, à espera de mensagens novas por parte dos *sensor nodes*.

Por outro lado, caso o ID não seja 0x00, a *gateway* procura o ID no *buffer* de ID e caso não o encontre considera que houve um erro na transmissão ou receção da mensagem e volta a abrir uma janela de receção. Caso o encontre, verifica se a mensagem possui dados de sensores e, caso possua, processa-os. Por fim, envia uma mensagem para o *sensor node* com um ACK. A Figura 5.13 mostra esta sequência. Após o envio dessa mensagem, volta a ficar á espera de novas mensagens abrindo uma nova janela de receção.

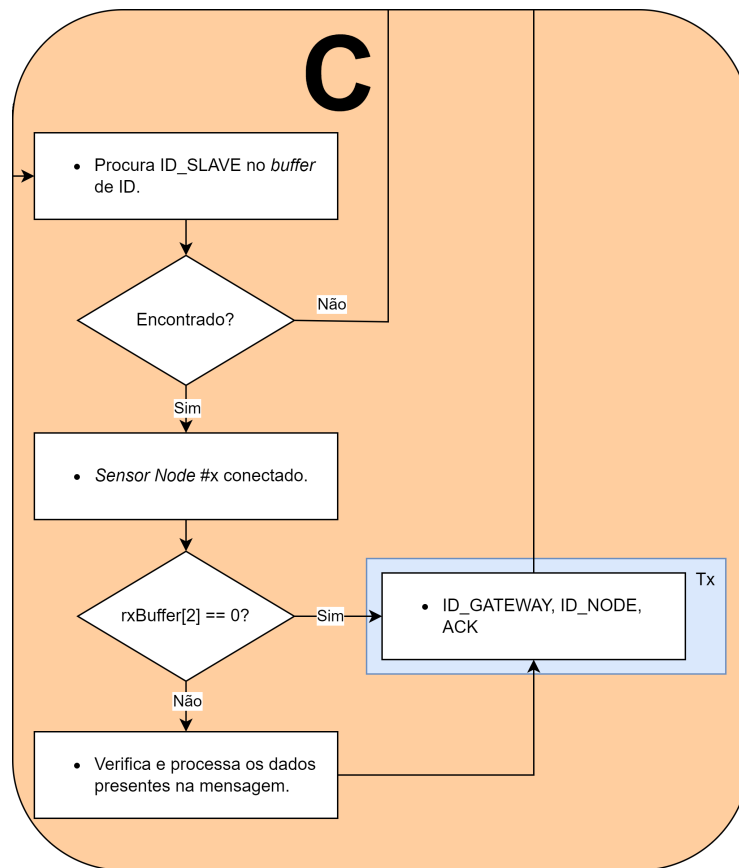


Figura 5.13: Parte C do fluxograma correspondente ao processamento da mensagem recebida

Segundo o protocolo LoRa, a gestão das mensagens recebidas é feita pelo protocolo em si, na eventualidade da *gateway* receber duas ou mais tentativas de conexão por parte dos *sensor nodes*, ou caso exista uma tentativa de conexão enquanto está a processar os dados de uma ligação prévia.

No capítulo seguinte, de resultados, irão ser testadas e validadas as implementações de *software* que foram feitas, tanto na *gateway* como no *sensor node*, e respetivos resultados, tanto a nível de consumo energético como de alcance.

Capítulo 6

Discussão

Neste capítulo vão ser apresentados os testes feitos à TL.SENSE e respectivas implementações e os seus resultados. Foram implementadas partes da arquitetura do sistema idealizada, focando na implementação de um caso de estudo. De igual importância ao correto funcionamento do sistema e interação entre *sensor node* e *gateway*, é a análise do consumo da TL.SENSE. Dessa forma, foram feitas medições antes e depois da implementação, utilizando diferentes configurações.

6.1 Testes e Resultados

De forma a medir os consumos de uma forma mais precisa e detalhada, foi utilizado um dispositivo desenvolvido pela Nordic Semiconductor, o Power Profiler Kit II ¹, Figura 6.1. Este dispositivo permite fazer uma análise minuciosa dos consumos, podendo medir desde os 200 nA até 1 A, com uma resolução variável entre 100 nA e 1 mA, dependendo da janela de medição. Conseguir uma taxa de amostragem de até 100 mil pontos por segundo, criando gráficos de consumo detalhados. Para realizar as medições dos consumos, deve ser ligado em série entre a TL.SENSE e a fonte de alimentação.

¹<https://cd0.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2>



Figura 6.1: Power Profiler Kit II

A Figura 6.2 corresponde à análise do consumo base da TL.SENSE, antes de ser programada e sem possuir algum sensor externo. Apenas os componentes base e essenciais se encontravam soldados. Como é de esperar, corresponde ao consumo estimado na Subsecção 4.4.9. Uma vez que, normalmente, nos *datasheet*, os consumos apresentados são valores médios, é possível assumir que o consumo medido de 0,843 mA, em oposição dos esperados 0,776 mA, seja um valor aceitável.

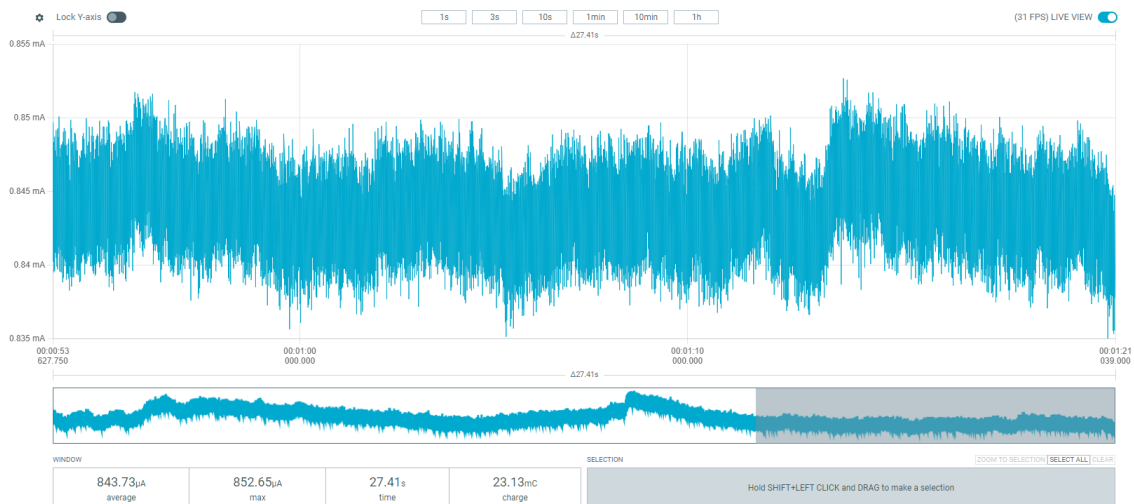


Figura 6.2: Consumo elétrico da TL.SENSE sem nenhum *firmware* nem sensores externos conectados

Após a análise dos consumos base da TL.SENSE, procedeu-se então à sua programação. Como descrito na Subsecção 4.7.1, um teste a ser feito foi a programação do exemplo “*Ping Pong*”, onde foi validada a implementação de *hardware*. Tendo as duas TL.SENSE a comunicar, com uma distância entre elas de sensivelmente 0,5 m dentro do laboratório, o mesmo *setup* foi testado ao ar livre, dentro do *campus* da FEUP, tanto no modo de transmissão em *Low-Power* como em *High-Power*.

Na Figura 6.3 é possível observar a distância máxima sem que houvesse falha na comunicação entre as duas placas. Foram conseguidos apenas cerca de 22 metros, em linha reta e linha de visão, em oposição das centenas de metros esperados no protocolo LoRa.

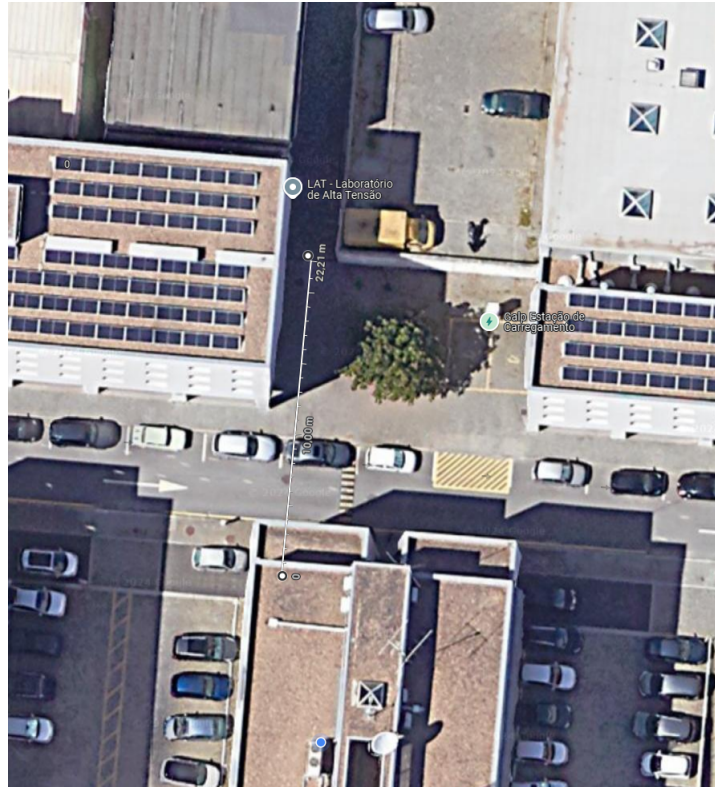


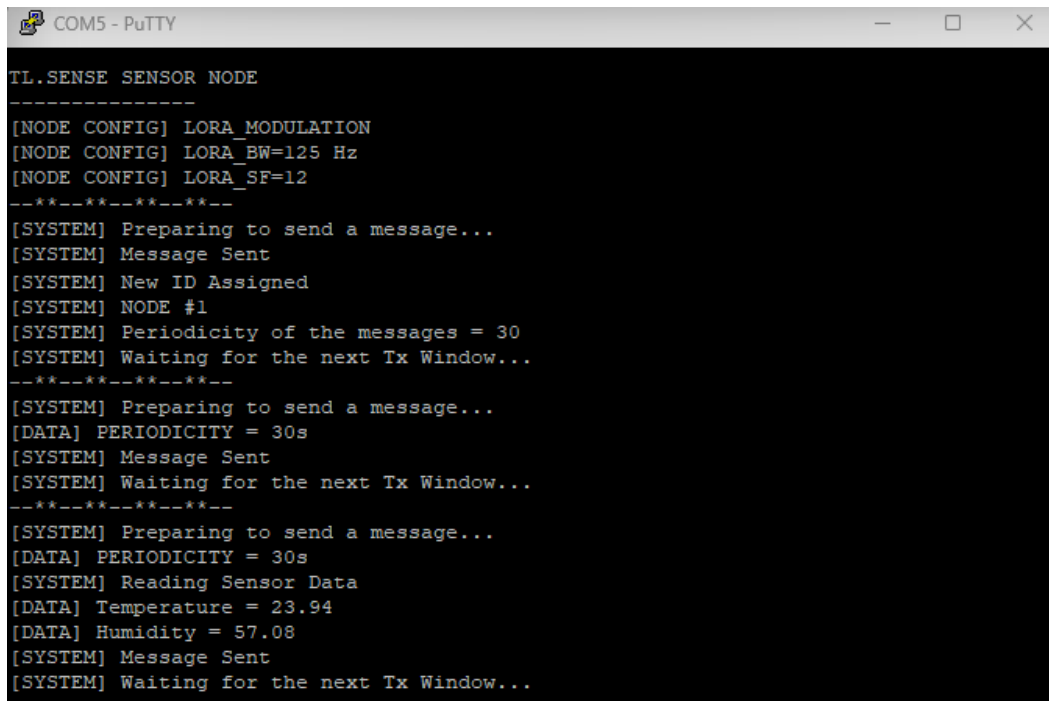
Figura 6.3: Teste de distância no exemplo “Ping Pong”. Campus da FEUP

Esta limitação do alcance máximo na comunicação pode dever-se a um curto circuito entre os dois pinos que definem o tipo de potência da transmissão (*High-Power* ou *Low-Power*), numa das duas placas. Este curto circuito poderá estar a acontecer diretamente nos pinos do microcontrolador, onde a única forma de confirmar e, caso se verifique, corrigir, é dessoldar toda a parte traseira da TL.SENSE para ser possível utilizar a cama quente para dessoldar o microcontrolador.

Tendo validado com sucesso a comunicação por radiofrequência, porém com uma limitação no alcance esperado, procedeu-se à programação e implementação dos *firmware* relativos às arquiteturas de sistema desenvolvidas. Como primeira implementação, foi idealizado um caso de estudo onde foi utilizado o sensor, já previamente utilizado, HTU21D-F. Neste caso de estudo, o *sensor node* ao ser ligado pela primeira vez possui o ID 0x00 e, dessa forma, envia um pedido de ID, como idealizado e representado no fluxograma presente na Secção 4.6. A *gateway*, por sua vez, verifica qual o primeiro ID livre e atribui-o ao *sensor node*. Este guarda o ID

e a informação sobre a frequência à qual tem de enviar dados, neste caso, a cada 30 segundos. Com essa periodicidade, a TL.SENSE acorda do modo de *sleep*, lê o sensor e envia os dados. Quando recebe o ACK por parte da *gateway*, volta a entrar em modo *sleep* até à próxima janela de transmissão.

Nas Figuras 6.4 e 6.5 podem observar-se as trocas de mensagens entre a TL.SENSE e a *gateway*. Para realizar estes testes, uma segunda TL.SENSE foi utilizada como *gateway*, tratando-se de uma comunicação P2P. Estas mensagens foram obtidas através do terminal série PuTTY². Apenas em modo de *debug* do sistema é que as mensagens pela UART são utilizadas, de forma a otimizar o sistema e não utilizar funções que possam aumentar o seu consumo energético.



```
COM5 - PuTTY
TL.SENSE SENSOR NODE
-----
[NODE CONFIG] LORA_MODULATION
[NODE CONFIG] LORA_BW=125 Hz
[NODE CONFIG] LORA_SF=12
--*--*--*--*--*--
[SYSTEM] Preparing to send a message...
[SYSTEM] Message Sent
[SYSTEM] New ID Assigned
[SYSTEM] NODE #1
[SYSTEM] Periodicity of the messages = 30
[SYSTEM] Waiting for the next Tx Window...
--*--*--*--*--*--
[SYSTEM] Preparing to send a message...
[DATA] PERIODICITY = 30s
[SYSTEM] Message Sent
[SYSTEM] Waiting for the next Tx Window...
--*--*--*--*--*--
[SYSTEM] Preparing to send a message...
[DATA] PERIODICITY = 30s
[SYSTEM] Reading Sensor Data
[DATA] Temperature = 23.94
[DATA] Humidity = 57.08
[SYSTEM] Message Sent
[SYSTEM] Waiting for the next Tx Window...
```

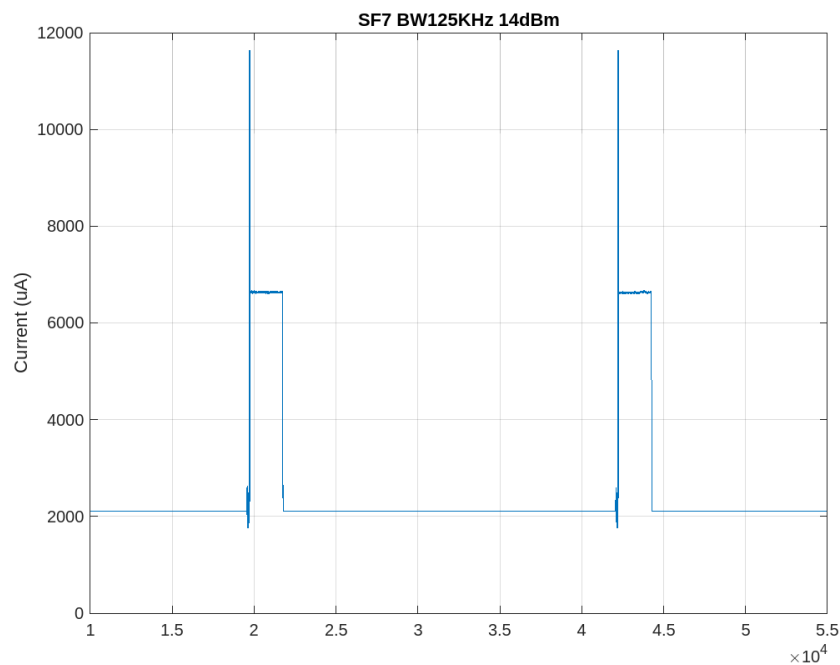
Figura 6.4: Terminal série com as mensagens relativas ao *sensor node*

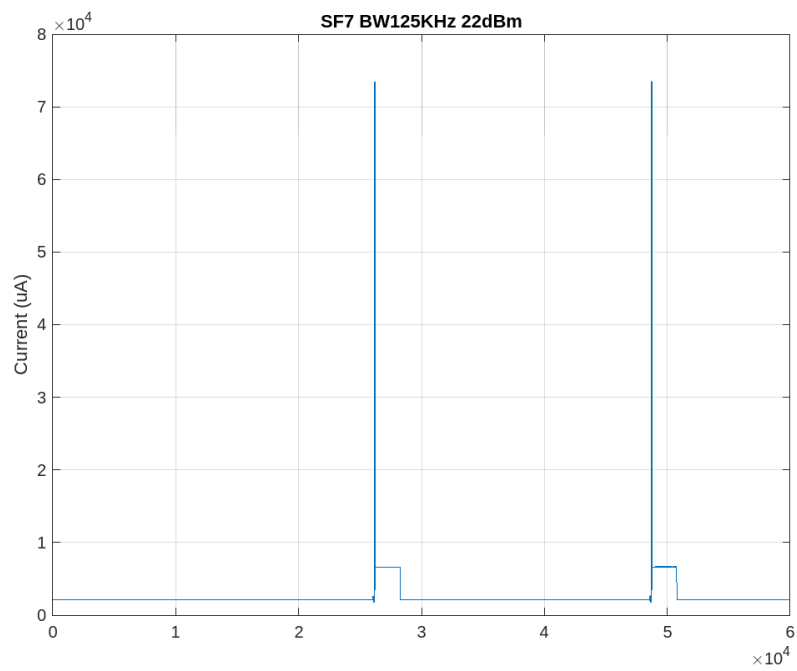
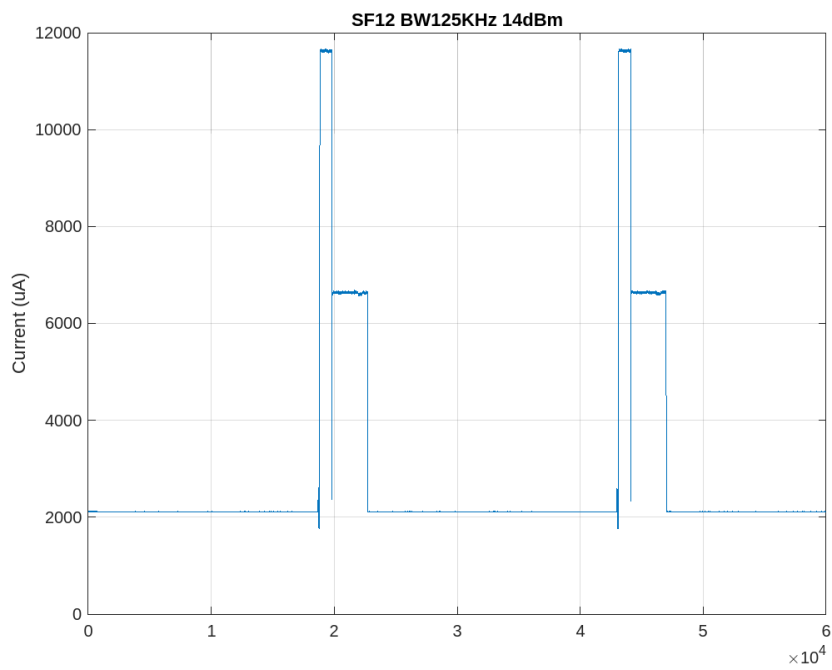
²<https://www.putty.org/>

```
COM6 - PuTTY
TL.SENSE GATEWAY
-----
LORA_MODULATION
LORA_BW=125 Hz
LORA_SF=12
-----
[SYSTEM] Waiting for message...
[SYSTEM] ID Not Found, Assigning New ID
[SYSTEM] Assigning Node #1, With the Identifier #19705
[SLAVES] SLAVE #1 WITH IDENTIFIER #19705 PRESENT
-----
[SYSTEM] Waiting for message...
[SYSTEM] New ID Assigned
-----
[SYSTEM] Waiting for message...
[SYSTEM] Node 1 connected
[DATA] Temperatura = 23.94
[DATA] Humidade = 57.08
-----
[SYSTEM] Waiting for message...
```

Figura 6.5: Terminal série com as mensagens relativas à *gateway*

Após a implementação do caso de estudo e a comprovação do seu correto funcionamento, foram testados 2 diferentes SF, nos dois modos de transmissão. Nas Figuras 6.6 a 6.9 é possível observar essas diferenças, onde os picos mais elevados correspondem às janelas de transmissão e os seguintes às janelas de recepção.

Figura 6.6: Transmissão *Low-Power*, 14 dBm com um SF7

Figura 6.7: Transmissão *High-Power*, 22 dBm com um SF7Figura 6.8: Transmissão *Low-Power*, 14 dBm com um SF12

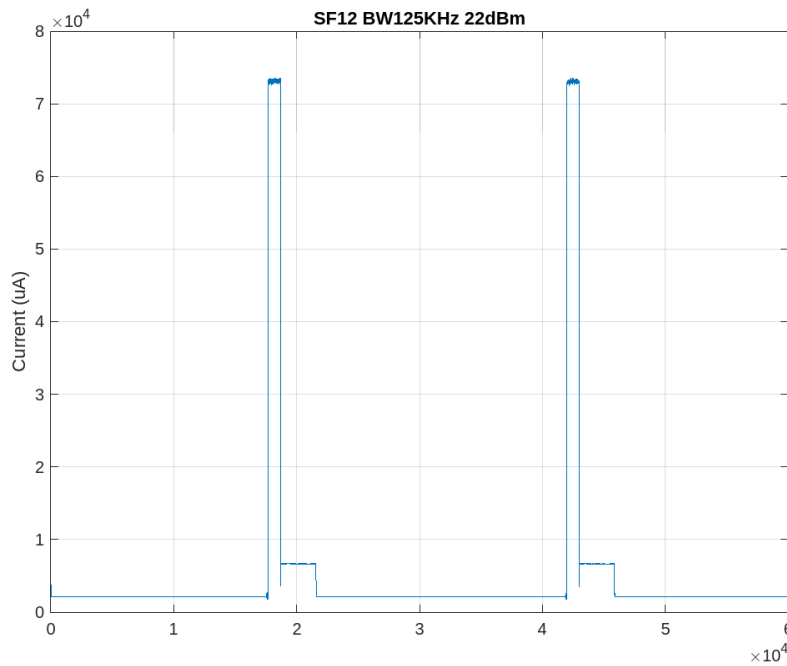


Figura 6.9: Transmissão *High-Power*, 22 dBm com um SF12

Como se pode verificar, são notáveis as diferenças entre os consumos nas diferentes configurações. Tendo um SF mais baixo, 7, comprova-se que o tempo em que o sistema está em modo de transmissão é mais reduzido, uma vez que o *time-on-air* é inferior, em oposição ao SF12, onde é claro o tempo de transmissão superior. O valor de consumo energético é superior no modo de transmissão *High-Power*, como esperado. Em relação às janelas de receção, o seu consumo não é alterado em nenhuma das configurações. Em todos os gráficos de consumo, quando o *sensor node* entra em modo *sleep*, é possível observar que o consumo é constante e igual a cerca de 2 mA. Este valor deve-se ao consumo somado de todos os componentes em *standby*, do microcontrolador e de alguns possíveis erros no dimensionamento e fabrico da PCB.

A Figura 6.10 mostra dois envios de mensagem por parte do *sensor node*, porém, depois da segunda transmissão é aberta uma primeira janela de receção. Respeitando o protocolo LoRa e a implementação idealizada, como o *sensor node* não recebeu nenhum ACK por parte da *gateway*, uma segunda janela de receção é aberta. Após ter recebido o ACK, o programa continua como esperado.

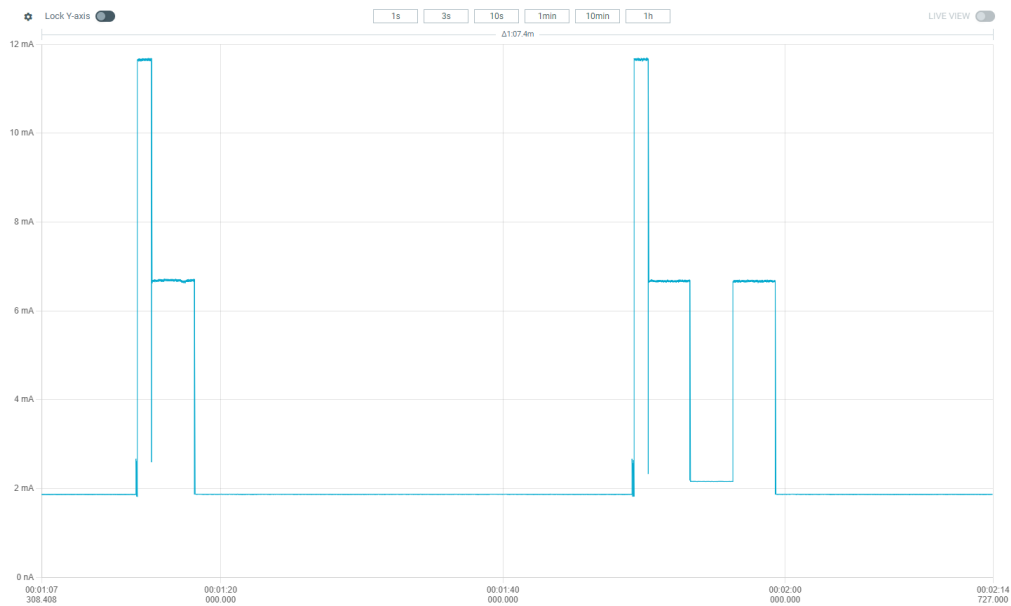


Figura 6.10: Abertura de 2ª janela de recepção após não recepção de ACK

Quando o microcontrolador entra em modo *sleep*, é necessário uma função que gere uma interrupção interna de forma a acordar o sistema. Ao utilizar o *stop 2 mode*, função que permite colocar o microcontrolador no estado mais profundo de *sleep*, são poucas as funções que o permitem. Foi, então, utilizada uma interrupção interna gerada pelo *Real Time Clock (RTC)*. Na sua configuração, foi preciso ter tido em consideração que o tempo é definido através de uma palavra *int16_t*, em milissegundos, e dessa, forma, o tempo máximo de contagem é 32,767 segundos. Quando o RTC atinge o valor definido gera uma interrupção interna, acordando o sistema. De forma a serem possíveis tempos superiores, foi implementada uma função que verifica quantas vezes são necessárias que o RTC conte. Caso o tempo desejado seja inferior a 32 segundos, o RTC conta diretamente esse mesmo tempo e acorda o sistema no final. Por outro lado, caso seja superior, o tempo desejado é dividido por 32 e o RTC conta o número de vezes inteiras necessárias e, por fim, conta o tempo que restar.

Por exemplo, se a frequência entre mensagens for 5 minutos, ou 300 segundos, o sistema conta nove vezes 32 segundos, ou seja, 288 segundos, e na última contagem, apenas os 12 segundos que faltam. Em cada uma das contagens de 32 segundos, é gerada na mesma a interrupção, acordando o sistema, porém, nestes casos, o sistema é posto a dormir novamente na função de *callback* gerada pela interrupção. Na Figura 6.11 pode-se observar um exemplo de envio de mensagens por parte do *sensor node* com uma frequência de 70 segundos.

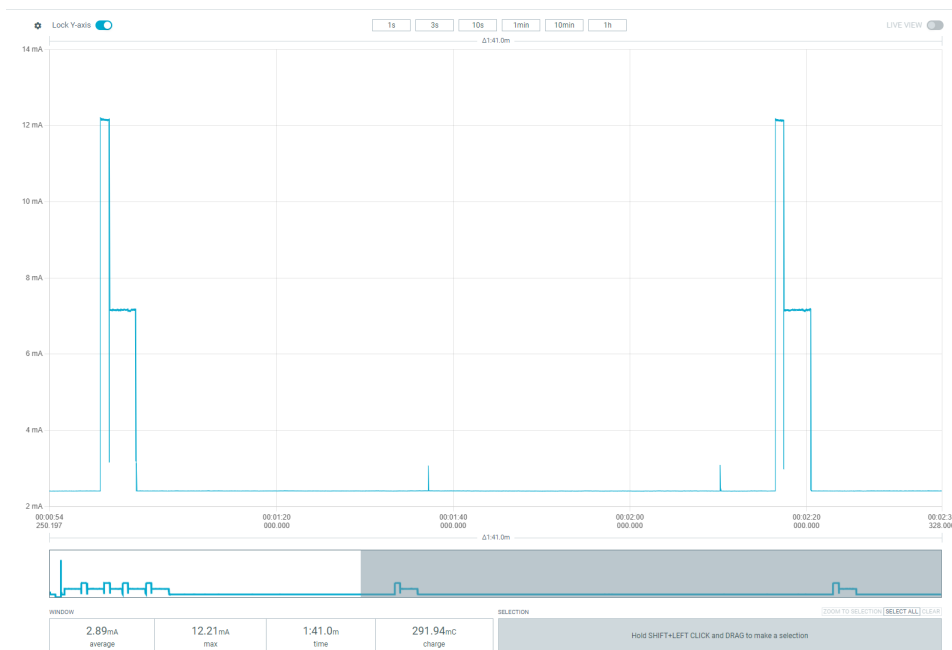


Figura 6.11: Envio de mensagens por parte do *sensor node* a cada 70 segundos

Entre a primeira janela de recepção e a segunda janela de transmissão é possível observar pequenos picos no consumo. Estes picos devem-se ao sistema acordar por breves instantes quando a interrupção é gerada. Neste caso, existem duas interrupções, a cada 32 segundos, e depois o sistema acorda a última vez, seguido da janela de transmissão passados os 6 segundos que faltam para completar os 70 segundos.

Por fim, na Figura 6.12, pode-se observar o gráfico de consumo da *gateway*. Esta, ao estar a funcionar como um dispositivo LoRa classe C, é de esperar que possua consumos mais elevados, os quais se comprovam. Durante o período de tempo em que o consumo é mais baixo, a *gateway* encontra-se com a janela de recepção fechada e a processar os dados recebidos. Antes da abertura da janela de recepção, é possível observar um pequeno aumento no consumo, originado pelo envio do ACK por parte da *gateway*.

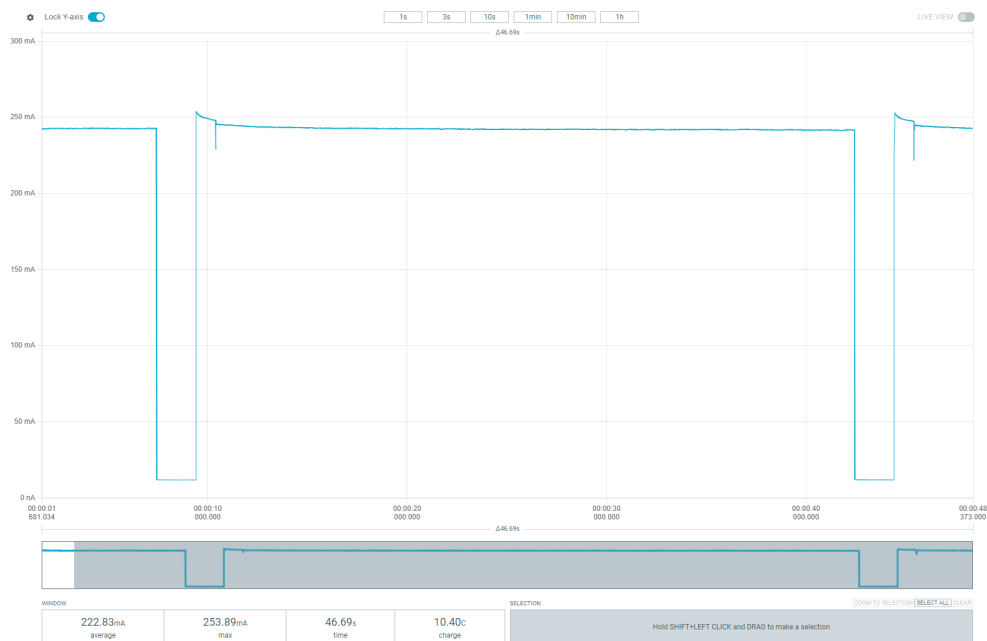


Figura 6.12: Gráfico de consumo da *gateway*

6.2 Principais Dificuldades

Devido a dificuldades no desenvolvimento, no processo de soldadura da TL.SENSE e no sucesso da implementação do exemplo “*Ping Pong*”, não foi possível a implementação total da arquitetura de sistema idealizada para o projeto. Em termos de *hardware*, todos os objetivos foram cumpridos, porém, relativamente ao *software*, apenas parte dos objetivos foram atingidos.

Relativamente ao processo de soldadura, o facto do microcontrolador necessitar de ser soldado através da cama quente, possuir uma distância entre os pinos bastante pequena, e não haver acesso aos seus pinos, tornou o processo mais complicado, originando bastantes curto circuitos, fazendo com que fosse necessário reiniciar todo o processo múltiplas vezes.

Relativamente à implementação e testes da comunicação por radiofrequência, foram testados e tentado implementar diversos *firmware* exemplo, desenvolvidos para a placa de expansão B-WL5M-SUBG1 pela STMicroelectronics. Nenhum deles teve sucesso na sua implementação na TL.SENSE, apenas o exemplo “*Ping Pong*” funcionou.

Todos estes contratemplos atrasaram a implementação final, fazendo com que nem todos os objetivos principais do trabalho fossem cumpridos.

Capítulo 7

Conclusões

No contexto atual da agricultura, a IoT tem ganho relevância devido à sua capacidade de monitorizar, em tempo real, diversos parâmetros ambientais e operacionais no terreno agrícola. A aplicação de dispositivos IoT nesse setor permite otimizar o uso de recursos, reduzindo custos operacionais e promovendo a sustentabilidade. No entanto, a eficácia da IoT em ambientes agrícolas depende diretamente da capacidade dos dispositivos de operar em locais remotos, com conectividade limitada e fontes de energia escassas. Neste cenário, as tecnologias LPWAN surgem como uma solução promissora, ao possibilitar comunicação de longa distância com baixo consumo energético, um fator essencial para a implementação da agricultura de precisão.

Com base nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um dispositivo PnP, integrado numa rede IoT escalável, utilizando tecnologias e protocolos de comunicação LPWAN. Este dispositivo foi projetado para adquirir e publicar dados em quase tempo real, priorizando a autonomia energética e a eficiência na recolha e transmissão de informações.

A solução desenvolvida ao longo desta dissertação, embora ainda não esteja pronta para ser implementada em campo, alcançou a maior parte dos objetivos propostos. Uma PCB de baixo consumo energético foi idealizada, dimensionada e desenvolvida, capaz de adquirir dados de sensores comerciais. Além disso, a implementação do protocolo de comunicação LoRa foi validada com sucesso em ambiente laboratorial e ao ar livre, onde foi possível a transmissão de dados e troca de mensagens entre o *sensor node* e a *gateway*, com uma distância aproximada de 25 m entre

os dispositivos.

Contudo, a realização dos testes de alcance revelou-se um ponto crítico. A falha no teste de alcance impediu a validação da distância máxima suportada pelo protocolo LoRa, o que inviabilizou a aferição de um dos principais objetivos iniciais, que visava a implementação numa área de operação mais extensa. Apesar dessa limitação, pode-se concluir que a utilização do protocolo LoRa, em contexto real, é viável e capaz de realizar as tarefas propostas, nomeadamente a recolha de dados, a transmissão de informação e a gestão energética eficiente.

Concluindo, os resultados obtidos até o momento permitem afirmar que a implementação de tecnologias LPWAN no campo da agricultura de precisão é uma solução promissora para enfrentar os desafios associados à conectividade e eficiência energética em ambientes remotos. Embora o dispositivo desenvolvido ainda necessite de ajustes, principalmente no que diz respeito ao alcance do protocolo, os avanços obtidos confirmam a viabilidade do projeto.

7.1 Trabalho Futuro

Para terminar o projeto, são necessárias algumas alterações e implementações de *firmware* de forma a completar a arquitetura de *software* idealizada. É necessário preparar o sistema e testar o seu comportamento para quando existem diversos *sensor nodes* a tentar aceder à rede LoRa, bem como testar a sua robustez e escalabilidade. São necessárias estas implementações, tanto do lado da TL.SENSE, como do lado da *gateway*.

Tendo o *firmware* completo, é necessário realizar novos testes de consumos e fazer o dimensionamento da bateria para alimentar o sistema durante o tempo pretendido, de forma a que não seja preciso uma manutenção e troca frequente de baterias. Antes de testar o sistema em ambiente real, no campo, é necessário arranjar uma caixa para proteger a PCB e facilitar o seu posicionamento. Essa caixa pode ser desenhada e impressa em 3D, por exemplo.

Por fim, o sistema derá ser colocado em funcionamento em campo, testado com diferentes sensores, com vários *sensor nodes*, a diferentes distâncias.

Referências

- [1] DNSstuff, “What is network topology? best guide to types diagrams,” Aug 2019. [Citado nas páginas 6, 7, 8 e 9]
- [2] S. Zhihua, “Design of smart home system based on zigbee,” in *2016 International Conference on Robots Intelligent System (ICRIS)*, pp. 167–170, 2016. [Citado na página 11]
- [3] D. R. Vincent, N. Deepa, D. Elavarasan, K. Srinivasan, S. H. Chauhdary, and C. Iwendi, “Sensors driven ai-based agriculture recommendation model for assessing land suitability,” *Sensors*, vol. 19, no. 17, 2019. [Citado na página 11]
- [4] Đoko Bandur, B. Jakšić, M. Bandur, and S. Jović, “An analysis of energy efficiency in wireless sensor networks (wsns) applied in smart agriculture,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 156, pp. 500–507, 2019. [Citado na página 11]
- [5] K. Aliev, M. M. Jawaid, S. Narejo, E. Pasero, and A. Pulatov, “Internet of plants application for smart agriculture,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, no. 4, p. 421 – 429, 2018. Cited by: 51; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. [Citado na página 12]
- [6] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, and M. Ismail, “Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review,” *Sensors*, vol. 17, no. 8, 2017. [Citado nas páginas 12 e 16]
- [7] E. Avşar and M. N. Mowla, “Wireless communication protocols in smart agriculture: A review on applications, challenges and future trends,” *Ad Hoc Networks*, vol. 136, p. 102982, 2022. [Citado nas páginas 12 e 16]
- [8] P. Visconti, R. de Fazio, R. Velázquez, C. Del-Valle-Soto, and N. I. Giannoccaro, “Development of sensors-based agri-food traceability system remotely managed by a software platform for optimized farm management,” *Sensors*, vol. 20, no. 13, 2020. [Citado na página 12]
- [9] Wi-Fi Alliance, “Wi-fi certified halow.” <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-certified-halow>, 2021. Acedido em: 15 de Fevereiro de 2024. [Citado na página 12]

-
- [10] IOT Factory. <https://iotfactory.eu/iot-knowledge-center/overview-of-iot-networks/>, 2021. Acedido em: 15 de Fevereiro de 2024. [Citado na página 13]
- [11] B. Miles, E.-B. Bourennane, S. Boucherkha, and S. Chikhi, “A study of lorawan protocol performance for iot applications in smart agriculture,” *Computer Communications*, vol. 164, pp. 148–157, 2020. [Citado na página 16]
- [12] LoRa Alliance, “What is lorawan specification.” <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>, 2023. Acedido em: 15 de Fevereiro de 2024. [Citado na página 16]
- [13] L. Tian, S. Santi, A. Seferagić, J. Lan, and J. Famaey, “Wi-fi halow for the internet of things: An up-to-date survey on ieee 802.11ah research,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 182, p. 103036, 2021. [Citado na página 16]
- [14] A. Valente, “Mems devices in agriculture,” in *Advanced Mechatronics and MEMS Devices II*, pp. 367–385, Cham, Switzerland: Springer, 2017. [Citado na página 31]
- [15] L. Santos, F. Santos, E. Solteiro Pires, A. Valente, P. Costa, and S. Magalhaes, “Path planning for ground robots in agriculture: A short review,” in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, (Ponta Delgada, Portugal), pp. 61–66, IEEE, April 15-17 2020. [Citado na página 31]
- [16] R. Gebbers and V. Adamchuk, “Precision agriculture and food security,” *Science*, vol. 327, pp. 828–831, 2010. [Citado na página 31]
- [17] D. Davcev, K. Mitreski, S. Trajkovic, V. Nikolovski, and N. Koteli, “Iot agriculture system based on lorawan,” in *Proceedings of the 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, (Imperia, Italy), pp. 1–4, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. [Citado nas páginas 31, 32 e 33]
- [18] G. Tresca, F. Vista, and P. Boccadoro, “Experimenting lora-compliant solutions in real world scenarios,” *Internet Technol. Lett.*, vol. 3, p. e136, 2020. [Citado nas páginas 32 e 33]
- [19] M. Bacco, A. Berton, E. Ferro, C. Gennaro, A. Gotta, S. Matteoli, F. Paonessa, M. Ruggeri, G. Virone, and A. Zanella, “Smart farming: Opportunities, challenges and technology enablers,” in *Proceedings of the 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture—Tuscany, IOT Tuscany 2018*, (Tuscany, Italy),

- pp. 1–6, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. [Citado nas páginas 32 e 33]
- [20] EasyEDA, “Easyeda - ferramenta de design de circuitos e simulação online.” <https://easyeda.com/pt>, 2024. Acedido em: 1 de Setembro de 2024. [Citado na página 38]
- [21] STMicroelectronics, *STM32WL5MOC Connectivity Expansion Board - User Manual*. STMicroelectronics, January 2024. https://www.st.com/resource/en/user_manual/um3127-stm32wl5moc-connectivity-expansion-board-stmicroelectronics.pdf. [Citado na página 39]
- [22] M. T. Inc., *RN2483 Low-Power Long-Range LoRa Technology Transceiver Module - Datasheet*, December 2021. Acedido em: 1 de Setembro de 2024. [Citado na página 39]
- [23] S. Corporation, *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver - Datasheet*, May 2020. Acedido em: 1 de Setembro de 2024. [Citado na página 39]
- [24] S. Corporation, *SX1261/2 Long Range, Low Power, sub-GHz RF Transceiver - Datasheet*, December 2021. Acedido em: 1 de Setembro de 2024. [Citado na página 39]
- [25] RAK Wireless, *RAK4260 WisDuo LPWAN Module Datasheet*, May 2019. Last Updated: 5/28/2024. [Citado na página 39]
- [26] RAK Wireless, *RAK3172 WisDuo LPWAN Module Datasheet*, Sept. 2019. Last Updated: 9/11/2024. [Citado na página 39]
- [27] STMicroelectronics, *STM32WLE5xx STM32WLE4xx - Multiprotocol LPWAN 32-bit Arm® Cortex®-M4 MCUs, LoRa®, (G)FSK, (G)MSK, BPSK, up to 256KB Flash, 64KB SRAM*, Nov. 2020. DS13105 Rev 8. [Citado na página 39]
- [28] STMicroelectronics, *STM32WL5MOC - Multiprotocol LPWAN dual-core module 32-bit Arm Cortex-M4/M0+ LoRa,(G)FSK, (G)MSK, BPSK*, Nov. 2020. DS14084 Rev 4. [Citado na página 39]
- [29] STMicroelectronics, *STSAFE-A110: Authentication, state-of-the-art security for peripherals and IoT devices*, rev 1 ed., December 2019. Datasheet - production data. [Citado na página 47]
- [30] STMicroelectronics, *M24256-DFMC6TG: 256-Kbit serial I²C bus EEPROM*, rev 35 ed., November 2020. Datasheet - production data. [Citado na página 48]

- [31] Macronix International Co., Ltd., *MX25L4006E: 4M-Bit CMOS Serial Flash Memory*, rev. 1.7 ed., January 2019. Datasheet - proprietary information. [Citado na página 49]