

Desenvolvimento e Implementação de uma Rede LoRa para Monitorização Sísmica com Sensores Acelerómetros

RÚBEN MIGUEL PAULO AZEVEDO

(Licenciado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações, na Área de Especialização de Telecomunicações

Orientadores:

Mestre Especialista Luís Miguel Rego Pires
Doutor Vítor Manuel de Oliveira Fialho

Júri:

Presidente: Doutor Rui António Policarpo Duarte
Vogal: Doutor Fernando Manuel Ascenso Fortes

Outubro de 2025

Desenvolvimento e Implementação de uma Rede LoRa para Monitorização Sísmica com Sensores Acelerómetros

RÚBEN MIGUEL PAULO AZEVEDO

(Licenciado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações, na Área de Especialização de Telecomunicações

Orientadores:

Mestre Especialista Luís Miguel Rego Pires, Departamento de
Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Computadores
(DEETC), ISEL, 1959-007 Lisboa, Portugal

Doutor Vítor Manuel de Oliveira Fialho, Departamento de
Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Computadores
(DEETC), ISEL, 1959-007 Lisboa, Portugal

Júri:

Presidente: Doutor Rui António Policarpo Duarte, Departamento de
Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Computadores
(DEETC), ISEL, 1959-007 Lisboa, Portugal

Vogal: Doutor Fernando Manuel Ascenso Fortes, Departamento de
Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Computadores
(DEETC), ISEL, 1959-007 Lisboa, Portugal

Outubro de 2025

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Luís Miguel Rego Pires e Professor Vítor Manuel de Oliveira Fialho, pela orientação, apoio e enorme disponibilidade ao longo dos últimos meses.

A todos os professores que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento tanto académico como pessoal ao longo dos meus anos como aluno desta grande instituição que é o ISEL.

A todos os meus colegas de curso e amigos, pelos momentos e experiências vividas dentro e fora desta instituição.

À minha família, por todo o apoio e paciência durante todo o meu percurso académico.

Um enorme obrigado a todos.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Rúben Azevedo

Lisboa, 19 de Setembro de 2025

Resumo

A monitorização sísmica desempenha um papel central na mitigação dos riscos associados a fenómenos naturais. Contudo, os sistemas tradicionais de deteção apresentam custos elevados e cobertura geográfica limitada, o que dificulta a sua implementação em larga escala. Neste contexto, soluções baseadas em redes *Internet of Things* (IoT), aliadas a dispositivos e sensores de baixo custo e baixo consumo, surgem como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de redes de monitorização mais acessíveis e flexíveis.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um sistema de deteção sísmica de baixo custo e consumo energético, baseado em um microcontrolador e acelerómetro comercial. O sistema realiza a aquisição e processamento de dados de aceleração, aplica algoritmos para identificação de eventos sísmicos e transmite a informação através de uma rede *Long Range/Long Range Wide Area Network* (LoRa/LoRaWAN).

Diversos testes foram realizados para avaliar a cobertura da comunicação rádio, a fiabilidade da transmissão de dados e o consumo energético, de modo a demonstrar a viabilidade de sistemas baseados em LoRa/LoRaWAN como solução económica e eficaz para monitorização sísmica. Entre os vários resultados obtidos, destacam-se a cobertura de aproximadamente 3 km, para uma taxa de receção de pacotes igual ou superior a 90% em cenário suburbano a rural, e uma autonomia de cerca de 160 horas.

Palavras-chave

Deteção Sísmica, Acelerómetros, IoT, LoRa, LoRaWAN, LPWAN.

Abstract

Seismic monitoring plays a central role in mitigating the risks associated with natural phenomena. However, traditional detection systems involve high costs and provide limited geographical coverage, which hinders their implementation on a large scale. In this context, solutions based on Internet of Things (IoT) networks, combined with low-cost, low-power devices and sensors, emerge as a promising alternative for developing more accessible and flexible monitoring networks.

This dissertation presents the development of a low-cost, energy-efficient seismic detection system based on a microcontroller and a commercial accelerometer. The system performs acceleration data acquisition and processing, applies algorithms for seismic event identification, and transmits the information through a Long Range/Long Range Wide Area Network (LoRa/LoRaWAN).

Several tests were carried out to evaluate radio communication coverage, data transmission reliability, and energy consumption, aiming to demonstrate the feasibility of LoRa/LoRaWAN based systems as a cost-effective and efficient solution for seismic monitoring. Notable results include a coverage of approximately 3 km with a packet reception rate greater than 90% in suburban to rural environments, and a battery life of at least 160 hours.

Keywords

Seismic Detection, Accelerometers, IoT, LoRa, LoRaWAN, LPWAN.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos	xix
1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Estrutura do Documento	2
1.3. Publicações Realizadas	3
2. Estado da Arte e Trabalhos Relacionados	5
2.1. Detecção de Atividade Sísmica.....	5
2.1.1. Sismograma	6
2.1.2. Instrumentos Sísmicos	7
2.2. Arquitetura IoT	12
2.3. Tecnologias Sem Fios	14
2.3.1. LoRa/LoRaWAN	14
2.3.2. NB-IoT (Narrow Band – Internet of Things)	17
2.3.3. SigFox.....	19
2.3.4. Comparação de Tecnologias	20
2.4. Trabalhos Relacionados.....	23
3. Aspectos Técnicos da Tecnologia LoRa/LoRaWAN	27
3.1. Modulação LoRa.....	27
3.2. Segurança	32
3.2.1. Over-The-Air-Activation	32
3.2.2. Activation By Personalization	33

3.3.	Formato de Mensagem	34
4.	Arquitetura do Sistema	39
4.1.	Diagrama de Blocos	39
4.2.	Elementos do Nó Final	40
4.3.	Gateway	43
4.4.	Servidor LoRaWAN	44
4.5.	Integração da plataforma Node-RED	45
5.	Implementação do Sistema	47
5.1.	Firmware do Nó Final	47
5.2.	Configuração da Gateway	55
5.3.	Configuração do Servidor LoRaWAN	56
5.4.	Interface de Utilizador	58
6.	Testes e Resultados	63
6.1.	Modelos de Propagação	63
6.1.1.	Propagação em Espaço Livre	63
6.1.2.	Modelo de Okumura-Hata	64
6.2.	Testes de Cobertura Rádio	65
6.2.1.	Resultados Teóricos	66
6.2.2.	Resultados Práticos	67
6.3.	Perda de Pacotes	71
6.4.	Consumo Energético	72
6.5.	Ensaio Final	75
7.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	79
	Referências	81
	Anexos	87

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Atividade sísmica ao longo da fronteira entre a Placa Euroasiática (EA), Africana (NU) e Norte-Americana (NA), entre 1926 e 2020 (retirado de [1]).	1
Figura 2.1 - Sismograma onde se distingue as fases P, S e as ondas de superfície (LR) (retirado de [6]).	7
Figura 2.2 - Resposta em frequência para diferentes tipos de sismómetro (adaptado de [6]).	8
Figura 2.3 - Esquema conceptual de um acelerómetro (adaptado de [1]).	9
Figura 2.4 - Acelerómetro piezoelétrico (adaptado de [8]).	9
Figura 2.5 - Acelerómetro piezoresistivo (adaptado de [8]).	10
Figura 2.6 - Acelerómetro capacitivo (adaptado de [8]).	10
Figura 2.7 - Estrutura de um acelerómetro MEMS capacitivo (retirado de [8]).	11
Figura 2.8 - Arquitetura IoT de 3 camadas.	12
Figura 2.9 - Modelo de camadas Lora/LoRaWAN (adaptado de [18]).	15
Figura 2.10 – Arquitetura de rede LoRaWAN (adaptado de [22]).	16
Figura 2.11 - Janelas de receção/transmissão das diferentes classes de dispositivos (adaptado de [23]).	17
Figura 2.12 - Modos de operação do NB-IoT (retirado de [25]).	18
Figura 2.13 - Comparação de tecnologias LPWAN em termos de fatores IoT.	22
Figura 3.1 - Representação de um up-chirp e down-chirp no domínio do tempo (adaptado de [35]).	27
Figura 3.2 - Espetrograma de um up-chirp e down-chirp (adaptado de [35]).	28
Figura 3.3 - Símbolos CSS para SF = 7 (adaptado de [36]).	29
Figura 3.4 - Variação do ganho de processamento em função de SF, CR=4/5.	31
Figura 3.5 - Relação entre o débito binário e SF, CR=4/5.	32
Figura 3.6 - Processo de ativação OTAA (adaptado de [21]).	33
Figura 3.7 - Formato da mensagem LoRa em uplink (adaptado de [38]).	34
Figura 3.8 - Espetrograma do preâmbulo de uma mensagem LoRa (adaptado de [35]).	34
Figura 3.9 - Formato do campo PHY Payload (adaptado de [39]).	36

Figura 4.1 - Arquitetura geral do sistema.....	39
Figura 4.2 -Placa de desenvolvimento Lilygo T-Beam (adaptado de [42]).	40
Figura 4.3 - Acelerómetro ADXL345 (retirado de [47]).	42
Figura 4.4 – Protótipo do nó final.....	43
Figura 4.5 - Dragino LG02 (retirado de [49])......	44
Figura 4.6 - Exemplo de uso do protocolo MQTT.....	45
Figura 5.1 - Diagrama de blocos do firmware implementado.....	47
Figura 5.2 - Fluxograma da rotina de verificação de atividade sísmica.....	49
Figura 5.3 - (a) Dataset (b) Espectograma.....	50
Figura 5.4 - Formato da mensagem de alerta.....	51
Figura 5.5 - Fluxograma da rotina de envio da mensagem de alerta.	52
Figura 5.6 - Formato da mensagem de dados.....	53
Figura 5.7 - Fluxograma da rotina de tratamento e envio das mensagens de dados.	54
Figura 5.8 - Configuração da ligação física LoRa.	55
Figura 5.9 - Configuração da ligação ao servidor LoRaWAN.....	55
Figura 5.10 - Registo da gateway no servidor LoRaWAN da TTN.	56
Figura 5.11 - Mensagens de estado da gateway.....	56
Figura 5.12 - Registo do nó final no servidor LoRaWAN da TTN.	57
Figura 5.13 - Mensagens em uplink provenientes do nó final.	57
Figura 5.14 - Configuração do nó MQTT.	58
Figura 5.15 - Flow Node-RED.	59
Figura 5.16 - Mensagem pop-up de alerta sísmico.....	59
Figura 5.17 - Dashboard: Janela "Deteção Sísmica".	60
Figura 5.18 - Dashboard: Janela "Rede".	60
Figura 5.19 - Exemplo de um ficheiro CSV gerado.....	61
Figura 6.1 - Vista da localização da gateway.....	65
Figura 6.2 - Distribuição espacial dos pontos de medição.....	66
Figura 6.3 - Curvas teóricas para a variação da potência recebida em função da distância,	

para uma frequência de trabalho de 868 MHz.....	67
Figura 6.4 - RSSI medido em função da distância à gateway.....	68
Figura 6.5 - Variação do RSSI em função do SF para diferentes pontos de medição, Ptx=14dBm.	69
Figura 6.6 - Curvas de RSSI medido vs teórico para Ptx=14 dBm e SF=12.	70
Figura 6.7 - Cenário de teste.....	75
Figura 6.8 - Janela "Detecção Sísmica" da interface de utilizador (Ensaio Final).	76
Figura 6.9 - Janela "Rede" da interface de utilizador (Ensaio Final).	77

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Frequência de vibração do solo provocada por diferentes atividades (adaptado de [6]).	6
Tabela 2.2 - Características de diferentes tecnologias LPWAN (adaptado de [29]).	20
Tabela 3.1 - Sensibilidade de um sistema LoRa para diferentes SF (adaptado de [16]).	31
Tabela 3.2 - Valor de M para diferentes SF e largura de banda de 125 kHz (adaptado de [41]).	37
Tabela 4.1 - Modos de operação do ESP32 (adaptado de [43]).	41
Tabela 4.2 - Características do módulo LoRa SX1276 e GPS Neo-6M (adaptado de [44] e [45]).	41
Tabela 4.3 - Principais características ADXL345 (adaptado de [46]).	42
Tabela 6.1 - Diferença de RSSI entre potências de transmissão de 14 dBm e 8 dBm.	71
Tabela 6.2 - Pacotes recebidos.	72
Tabela 6.3 - Modo de consumo de cada elemento do nó.	73
Tabela 6.4 - Consumo instantâneo de cada elemento do nó.	73
Tabela 6.5 - Consumo energético por estado.	74
Tabela 6.6 - Tempo de execução diária de cada estado.	74

Acrónimos

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ABP	<i>Activation By Personalization</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CR	<i>Code Rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
EUI	<i>Extended Unique Identifier</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</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>
M2M	<i>Machine To Machine</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MEMS	<i>Micro-ElectroMechanical System</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>

NB-IoT	<i>Narrow-Band Internet of Things</i>
NLOS	<i>Non-Line of Sight</i>
OTAA	<i>Over-The-Air-Activation</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PSRAM	<i>Pseudo Static Random Access Memory</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
ROM	<i>Read-Only Memory</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
SS	<i>Spread Spectrum</i>
ToA	<i>Time on Air</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

1. Introdução

A atividade sísmica constitui um fenómeno natural de grande relevância, com implicações significativas ao nível da segurança das populações, danos em infraestruturas e desenvolvimento socioeconómico das regiões afetadas. Em Portugal, a ocorrência de sismos está intimamente ligada à sua localização geográfica, situada na proximidade da fronteira entre as placas tectónicas Euro-Asiática e Africana, Figura 1.1. Esta interação entre placas, particularmente ao longo da falha Açores-Gibraltar, que se estende desde o arquipélago dos Açores até ao sul da Península Ibérica, confere ao território português uma vulnerabilidade sísmica moderada, mas com potencial para eventos de grande magnitude [1].

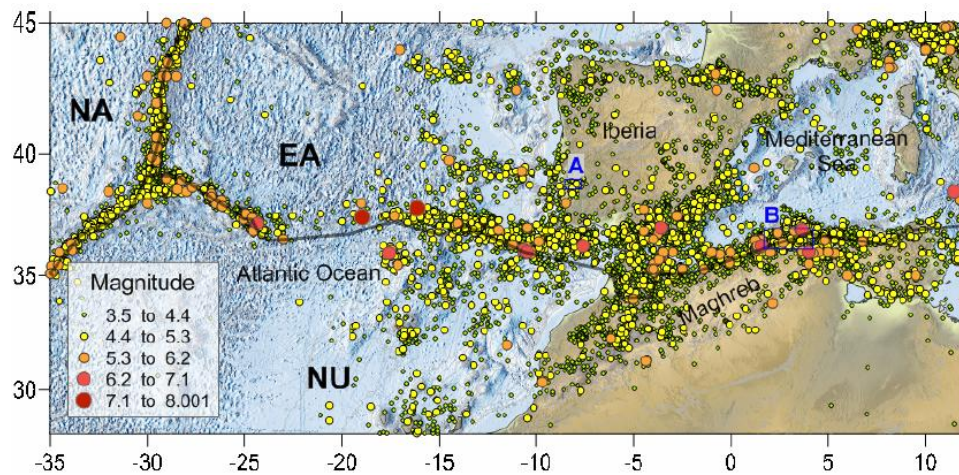


Figura 1.1 - Atividade sísmica ao longo da fronteira entre a Placa Euroasiática (EA), Africana (NU) e Norte-Americana (NA), entre 1926 e 2020 (retirado de [1]).

Historicamente, Portugal foi palco de diversos sismos de grande impacto, sendo o terramoto de 1755 um dos mais estudados e devastadores da história europeia, não apenas pelos danos estruturais e número de vítimas, mas também pelas suas consequências socioeconómicas e científicas [2]. Outros eventos, como os sismos de 1909 em Benavente [2], de 1969 ao largo do Algarve [1], ou mais recentemente, em agosto de 2024, quando um sismo de magnitude 5,3 na escala de *Richter* foi sentido a oeste de Sines [3], evidenciam a recorrência de atividade sísmica, o que impõe a necessidade de uma abordagem contínua para a sua monitorização.

Atualmente, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), em colaboração com outras entidades, desempenha um papel essencial na monitorização sísmica, dispondo de uma rede composta por aproximadamente 90 estações distribuídas pelo território de Portugal Continental e pelas Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores [4].

No entanto, estas estações podem apresentar custos elevados e requerem uma ligação permanente à rede elétrica, fatores que tornam a sua implementação inviável em locais onde os custos de instalação não são justificáveis ou não existe acesso à rede elétrica.

A utilização de soluções baseadas em IoT revela-se uma alternativa promissora para ultrapassar estas limitações. Os nós IoT podem ser desenvolvidos com componentes de baixo custo e sensores de baixo consumo energético, capazes de funcionar de forma autónoma durante longos períodos de tempo sem necessidade de ligação permanente à rede elétrica. Estes dispositivos revelam-se particularmente adequados para instalação em áreas remotas ou de difícil acesso, onde a implementação de estações sísmicas tradicionais se torna impraticável.

Uma das tecnologias que mais impulsiona as redes IoT é o LoRa/LoRaWAN. Esta tecnologia destaca-se pela capacidade de estabelecer ligações de longa distância com baixo consumo energético, tornando-se particularmente adequada para cenários de monitorização em locais com uma infraestrutura de comunicações limitada.

1.1. Objetivos

Neste contexto, a presente dissertação propõe-se a desenvolver uma rede IoT, com base na tecnologia LoRa/LoRaWAN dedicada à monitorização sísmica, integrando sensores do tipo acelerómetros. O foco será na análise do desempenho da comunicação LoRa em áreas de difícil acesso, onde a instalação de infraestruturas tradicionais é inviável. O projeto incluirá a implementação de um nó IoT equipado com sensores acelerómetros e respetiva ligação a uma rede LoRaWAN, testes de campo para avaliação da qualidade do sinal e da fiabilidade dos dados transmitidos, e o desenvolvimento de algoritmos de processamento de sinal para deteção precoce de oscilações da crosta terrestre. A pesquisa pretende demonstrar a viabilidade do uso de redes LoRaWAN como uma solução económica e eficaz para a monitorização sísmica.

1.2. Estrutura do Documento

Este documento está estruturado em 7 capítulos distintos.

No primeiro capítulo, é apresentado o enquadramento do tema e delineados os principais objetivos desta dissertação. Adicionalmente é feita menção à publicação de um artigo relevante, desenvolvido em paralelo com a dissertação.

De seguida, no segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica onde são

abordados tópicos teóricos e projetos relevantes para a compreensão do sistema desenvolvido.

No terceiro capítulo, é apresentado um estudo detalhado da tecnologia LoRa/LoRaWAN, no qual são abordadas características técnicas, como a modulação do sinal e a estrutura das mensagens.

No quarto capítulo, é delineada a arquitetura da rede IoT implementada, acompanhada por uma descrição do *hardware* e ferramentas utilizadas.

O quinto capítulo aborda o desenvolvimento do sistema, onde são descritas as soluções implementadas.

No sexto capítulo, são apresentados todos os testes realizados para avaliar a fiabilidade e eficiência energética do sistema projetado.

O sétimo e último capítulo faz o balanço do projeto, apresentando as conclusões e futuras melhorias ao sistema.

1.3. Publicações Realizadas

Em paralelo com o desenvolvimento desta dissertação foi realizado o artigo “*Low-Power IoT Seismic Detection with Machine Learning Integration*” apresentado na conferência YEF-ECE 2025 – *9th International Young Engineers Forum on Electrical and Computer Engineering* e publicado em [5]

Este artigo descreve o processo de treino e implementação de um modelo de *Machine Learning* (ML), utilizado posteriormente pelo nó final como algoritmo de decisão para classificar um evento como atividade sísmica ou não.

O próximo parágrafo contém o resumo presente no artigo:

“This paper presents a real-time seismic monitoring system based on low-power Internet of Things (IoT) nodes equipped with Micro-Electromechanical Systems (MEMS) accelerometers and Machine Learning (ML) algorithms for earthquake detection. The system employs edge computing to process data locally to lower latency and reduce cloud infrastructure dependence. Designed for energy-efficient operation, this approach enables continuous monitoring in remote or resource-constrained environments. The addition of ML enhances the detection of seismic events, offering a cost-effective and scalable solution for early warning applications. Performance metrics were used to evaluate how effectively the ML model performs, achieving high accuracy (92%) and precision (94%).”

2. Estado da Arte e Trabalhos Relacionados

O avanço nas tecnologias de sensores e redes de comunicação tem permitido o desenvolvimento de sistemas capazes de detetar eventos sísmicos com maior precisão e rapidez, contribuindo assim para a segurança de populações e a preservação de infraestruturas críticas. Neste capítulo são abordados conceitos e tecnologias relevantes no contexto desta dissertação, nomeadamente o conceito de atividade sísmica de um ponto de vista geológico, tipos de sensores utilizados para a sua deteção, arquitetura IoT e diferentes tecnologias para a sua implementação. Em último, são apresentados alguns trabalhos relacionados.

2.1. Deteção de Atividade Sísmica

Qualquer material geológico, quando submetido continuamente a tensões, acumula energia e deforma enquanto a sua elasticidade o permitir. Segundo a Teoria do Ressalto Elástico, proposta pelo geofísico americano Henry Reid no início do século XX, quando é ultrapassado o limite de deformação elástica dos materiais rochosos, estes fraturam, libertando bruscamente grande parte da energia acumulada, que se propaga sob a forma de ondas sísmicas. Estas ondas propagam-se a partir do ponto da rutura, denominado de hipocentro, e dividem-se em ondas primárias (ou ondas P) e ondas secundárias (ou ondas S), que se propagam pelo interior da crosta terrestre, e ondas de superfície que, tal como o nome indica, se propagam ao longo da superfície do planeta. Diferentes tipos de onda possuem diferentes velocidades de propagação: ondas P são as primeiras a serem detetadas, podendo a sua velocidade variar entre 8 e 14 km/s, seguidas pelas ondas S, com velocidades entre 4 e 7 km/s, e por fim as ondas de superfície, que se subdividem em ondas de *Rayleigh* e ondas de *Love*, e cuja velocidade de propagação varia entre 3,5 e 4,5 km/s [1][6].

Ao fenómeno descrito anteriormente dá-se o nome de sismo ou terramoto. Os sismos resultam então de movimentos de amplitude relativamente elevada causados pela libertação de grandes quantidades de energia acumulada como, por exemplo, em falhas tectónicas, explosões ou erupções vulcânicas. No entanto, nem todos os movimentos do solo são considerados sismos. Em facto, o solo está continuamente em movimento o que, de uma perspectiva sismológica, é considerado ruído indesejado para a deteção de atividade sísmica. A este ruído se dá o nome de ruído sísmico [1].

O ruído sísmico pode ter várias origens, sendo o principal denominado de ruído urbano. Este é o ruído causado pelo ser humano através de tráfego automóvel, construção civil, indústria,

etc. Fontes naturais de vibração como marés e oscilações livres da Terra também são consideradas ruído sísmico [1].

Diferentes tipos de atividades geram características de movimento distintas, como pode ser observado na Tabela 2.1. É importante compreender estas características de modo que sejam desenvolvidos instrumentos de medida adequados à observação pretendida.

Tabela 2.1 – Frequência de vibração do solo provocada por diferentes atividades (adaptado de [6]).

Frequência [Hz]	Tipo de Atividade
5 - 2000	Exploração mineira
0.2 - 80	Sismicidade local
0.0 - 100	Registo de movimentos fortes
0.05 - 20	Sismicidade regional
0.01 – 10	Energia de sismos distantes
0.003 – 0.2	Dispersão de ondas de superfície
0.0005 – 0.01	Marés, Oscilações livres da Terra

2.1.1. Sismograma

Um sismograma é o registo temporal do sinal captado por um instrumento de medição, situado a uma certa distância do epicentro da fonte sísmica, e representa uma componente do movimento do solo causado pelas ondas sísmicas [6].

Cada evento registado por um sismograma é designado como fase sísmica. As ondas P, sendo as que se propagam com maior velocidade, são as primeiras a serem detetadas, e correspondem à primeira fase do registo. Seguem-se as ondas S, que geralmente apresentam uma amplitude superior à das ondas P. Por fim, chegam as perturbações associadas às ondas superficiais, também denominadas por ondas longas, que possuem um comprimento de onda significativamente maior, bem como uma amplitude e um período superiores aos das restantes ondas. De entre as ondas longas, as ondas de *Love* deslocam-se com uma velocidade mais próxima das ondas S à superfície, sendo detetadas primeiro que as ondas de *Rayleigh* [6]. Na Figura 2.1 é possível observar um exemplo de um sismograma onde se identifica as diferentes fases do mesmo.

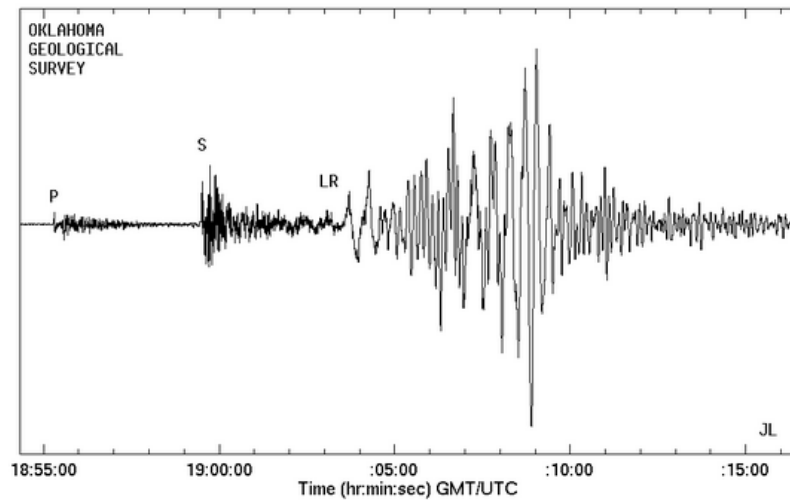


Figura 2.1 - Sismograma onde se distingue as fases P, S e as ondas de superfície (LR) (retirado de [6]).

As fases registadas pelos sismogramas variam consoante o tipo de sensor utilizado e a sua orientação em relação à direção de propagação das ondas sísmicas. Por exemplo, um sensor de componente vertical é capaz de detetar ondas P, ondas SV (ondas S com polarização vertical) e ondas de *Rayleigh*, mas não consegue captar ondas SH (ondas S com polarização horizontal) nem ondas de *Love*. Por outro lado, um sensor de componente horizontal consegue registar ondas P, ondas SH, ondas de *Rayleigh* e ondas de *Love*. Em sistemas de deteção precoce, o tempo de chegada e amplitude das ondas P são cruciais, pelo que sistemas deste tipo terão de ser capazes de detetar tanto a componente vertical como horizontal [6].

2.1.2. Instrumentos Sísmicos

Os instrumentos sísmicos podem ser concebidos para medir o deslocamento, a velocidade ou a aceleração do solo. Os sensores que medem a velocidade, e que podem igualmente ser empregues na medição do deslocamento, são designados por sismómetros, enquanto aqueles que medem diretamente a aceleração são denominados acelerómetros [6].

Atualmente, os sismómetros classificam-se em três categorias: período curto, banda larga e banda muito larga. A principal diferença entre eles reside na gama de frequências em que operam. Por exemplo, um sismómetro de banda muito larga é capaz de medir frequências extremamente baixas, até 0,001 Hz, enquanto um de período curto consegue registar deslocamentos em frequências até 100 Hz [6]. A gama de frequências correspondente a cada categoria de sismómetros pode ser visualizada na Figura 2.2.

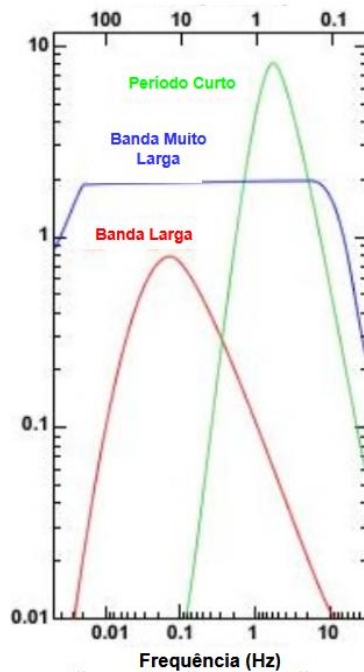


Figura 2.2 - Resposta em frequência para diferentes tipos de sismómetro (adaptado de [6]).

Estes instrumentos também são denominados por sensores de movimentos de baixa amplitude. Esta designação deve-se ao facto de os sismómetros serem concebidos para detetar as mais pequenas movimentações do solo, o que pode resultar na sua saturação quando um sismo local de grande intensidade ocorre. Para estas situações, sensores de movimentos de grande amplitude, como os acelerómetros, podem ser utilizados, uma vez que estes permitem registar o movimento do solo para além do ponto em que os sismómetros saturam. Em contrapartida, estes sensores são menos sensíveis a baixas frequências, o que dificulta a deteção de sismos distantes ou de baixa intensidade quando ocorrem fora da gama de operação do acelerómetro [6]. Estas características tornam o acelerómetro uma solução mais apropriada para sistemas de alerta precoce de sismos locais, complementando os sistemas baseados em sismómetros tradicionais.

Os acelerómetros são geralmente compostos por uma massa suspensa numa estrutura fixa. Quando uma vibração ocorre, a inércia faz com que a massa resista ao movimento. A força exercida pela massa é contrariada por uma mola, cujo deslocamento é diretamente proporcional à força aplicada. Assim, a aceleração do corpo pode ser determinada a partir do deslocamento da massa. Esta aceleração é convertida em um sinal elétrico, que é posteriormente processado [7].

Na Figura 2.3 observa-se um esquema conceptual da estrutura de um acelerómetro.

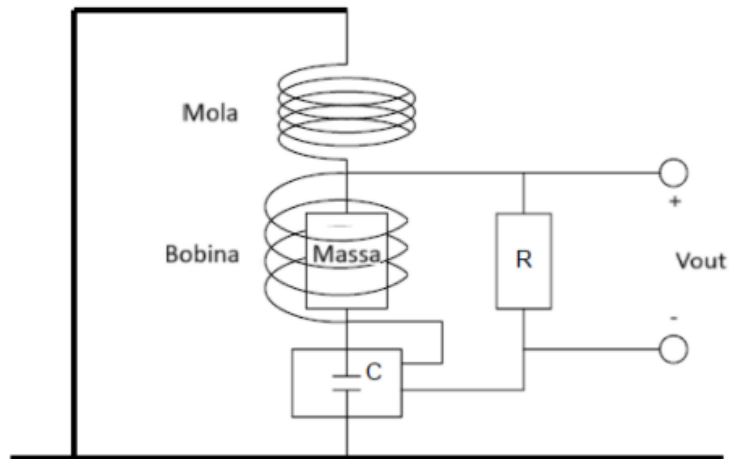


Figura 2.3 - Esquema conceptual de um acelerômetro (adaptado de [1]).

Existem vários tipos de acelerômetros que abordam o conceito anterior de formas distintas. De entre os acelerômetros mecânicos, os mais comuns são os piezoelétricos, piezoresistivos e capacitivos.

Os acelerômetros piezoelétricos funcionam com base no efeito piezoelétrico. Conforme ilustrado na Figura 2.4, o material piezoelétrico é utilizado como elemento ativo do acelerômetro, estando uma das suas extremidades ligada à estrutura fixa e a outra à massa inercial. Quando a massa é submetida a uma aceleração, o material piezoelétrico experimenta uma força, de acordo com a segunda lei de *Newton*, fazendo com que estes se deformem e desenvolvam uma carga elétrica proporcional à aceleração [8].

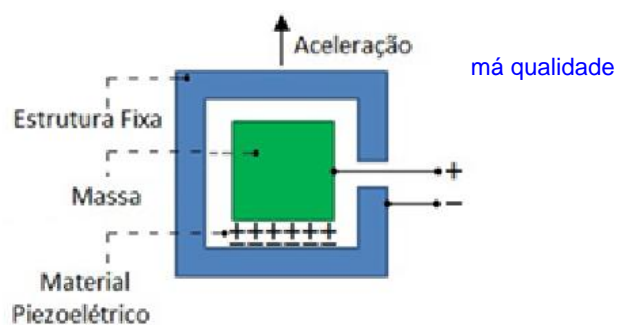


Figura 2.4 - Acelerômetro piezoelétrico (adaptado de [8])

Em acelerômetros piezoresistivos, como o nome indica, são utilizados materiais piezoresistivos como elemento ativo para medição da aceleração. A massa de inercial está acoplada a uma das extremidades de uma viga, enquanto a outra extremidade encontra-se fixa à estrutura do acelerômetro. A viga é revestida por uma camada de material piezoresistivo

que, ao ser aplicada uma força, provoca a deformação da viga e, conseqüentemente, do material piezoresistivo, resultando numa variação da sua resistência elétrica [8]. Este comportamento pode ser visualizado na Figura 2.5.

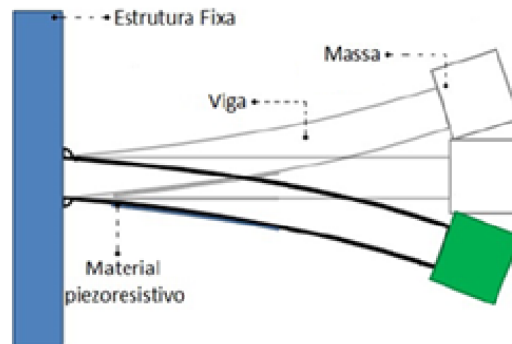


Figura 2.5 - Acelerômetro piezoresistivo (adaptado de [8]).

Os acelerômetros capacitivos variam a sua capacidade elétrica quando sujeitos a algum tipo de aceleração. Diferentes configurações podem ser implementadas, no entanto, na sua versão mais tradicional, um acelerômetro deste tipo possui uma placa móvel como massa inercial que se desloca em resposta à aceleração. Esta placa está posicionada entre duas placas fixas, formando assim dois condensadores (Figura 2.6). O movimento da placa móvel, causado pela aceleração, altera a distância entre as placas, modificando o valor da capacidade de cada condensador [8].

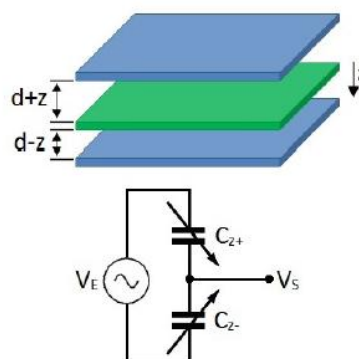


Figura 2.6 - Acelerômetro capacitivo (adaptado de [8]).

Com novas técnicas e tecnologias, o uso de acelerômetros eletromecânicos, tais como sensores micro-eletromecânicos (*Micro-ElectroMechanical Systems* - MEMS), tem-se tornado cada vez mais comum, substituindo os acelerômetros mecânicos tradicionais [8].

Estes sensores utilizam um processo de fabrico distinto, baseado em estruturas de silício, o que permite a produção de acelerómetros à escala micro (Figura 2.7), mantendo os princípios dos acelerómetros anteriormente descritos [9]. Os mais comuns são os acelerómetros MEMS capacitivos e piezoresistivos [7].

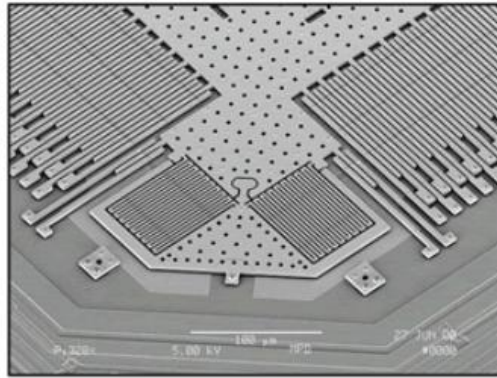


Figura 2.7 - Estrutura de um acelerómetro MEMS capacitivo (retirado de [8]).

O seu tamanho reduzido, comparativamente com os homólogos mecânicos, baixo consumo energético, facilidade de integração e bom desempenho torna esta tecnologia uma boa alternativa para aplicações onde as dimensões físicas e consumo de energia são fatores cruciais como, por exemplo, em projetos IoT e dispositivos eletrónicos pessoais [7][9].

De modo a escolher o acelerómetro ideal para uma dada aplicação, um conjunto de fatores devem ser considerados. Abaixo encontra-se uma lista com as principais características de um acelerómetro [7][8]:

- **Sensibilidade:** capacidade para detetar movimento, ou seja, a razão entre a saída elétrica e a sua entrada mecânica. Tipicamente expressa em milivolt por grama (mV/g).
- **Resolução:** representa a menor alteração possível na entrada mecânica para a qual uma alteração na saída elétrica é perceptível. Expressa em mg/LSB.
- **Largura de Banda:** especifica a banda de frequência em que o funcionamento do acelerómetro é linear. Geralmente expresso em unidade de frequência (Hz).
- **Gama Dinâmica:** representa o valor máximo e mínimo de aceleração que o sensor consegue medir antes de distorcer ou saturar o sinal na saída. Tipicamente expressa na unidade de aceleração não SI força-g (g).
- **Linearidade:** demonstra o quanto linear é a saída do acelerómetro dentro da sua gama dinâmica.

- **Orientação:** indica quantos/quais os eixos cartesianos em que o acelerómetro é capaz de realizar medições.
- **Consumo:** especifica o consumo elétrico necessário para operar. Tradicionalmente medido em miliampere (mA) ou microampere (μA).
- **Densidade de Ruído:** acelerómetros estão sujeitos a ruído proveniente de fontes mecânicas e elétricas. A densidade de ruído é representada em termos de densidade espectral de potência sendo expressa em $\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

2.2. Arquitetura IoT

Devido à diversidade de linguagens, protocolos e normas, bem como a falta de acordo sobre quais melhor se adequam para definir as diferentes camadas IoT, vários modelos de arquitetura foram propostos, não existindo um modelo de referência consensual [10]. Por uma questão de simplicidade e pelo facto de ser uma das arquiteturas com maior aceitação dentro da comunidade, é feito a referência ao modelo de 3 camadas apresentado na Figura 2.8.

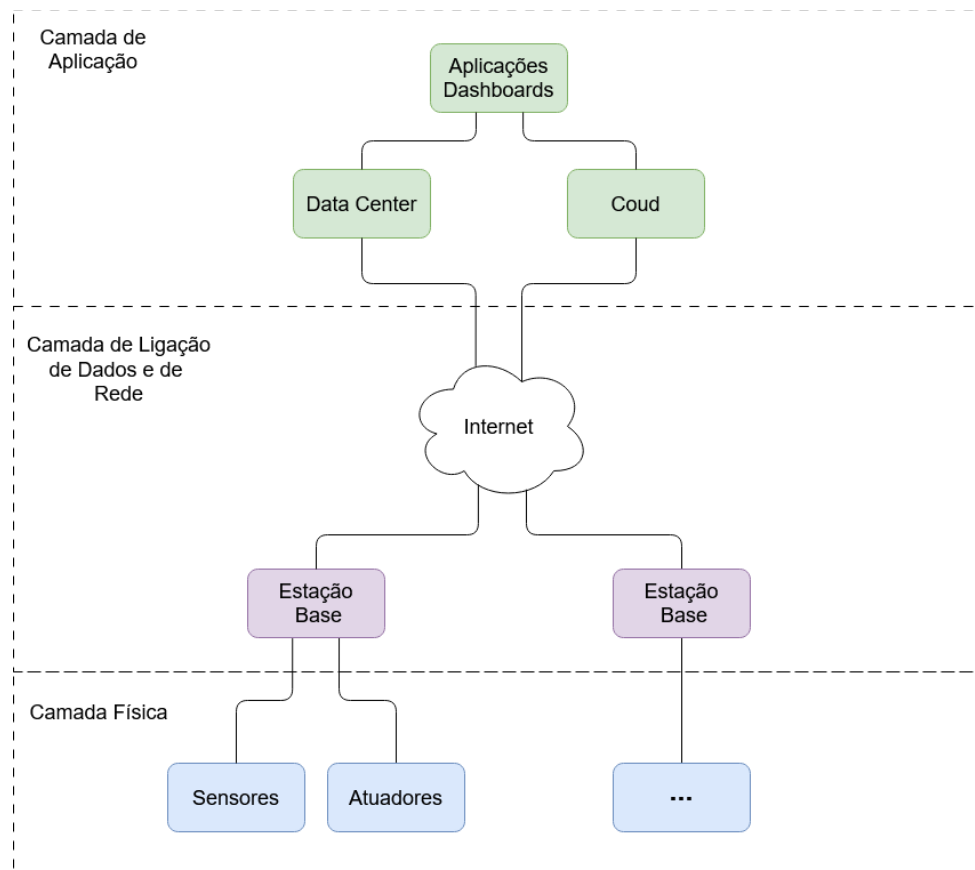


Figura 2.8 - Arquitetura IoT de 3 camadas.

Este modelo é constituído pela camada física, camada de ligação de dados e de rede e camada de aplicação [11].

A camada de física contém os elementos físicos que interagem com o ambiente circundante recolhendo e processando grandezas físicas como temperatura, movimento, pressão, entre outros. Estes elementos são os blocos fundamentais de qualquer arquitetura IoT, podendo tomar a forma de objetos do quotidiano (Ex.: frigorífico, televisão, automóvel) ou dispositivos, como microcontroladores, equipados com diversos tipos de sensores e/ou atuadores. No caso destes últimos, destaca-se a necessidade de desenvolver *firmware* específico para permitir a interação com os diferentes periféricos e tecnologias.

A camada de ligação de dados e de rede é responsável pelo transporte dos dados provenientes da camada física para a camada de aplicação. Este nível é predominantemente constituído por dispositivos como *gateways*, *switches* e *routers*, que operam com base em diferentes protocolos e tecnologias de transmissão com e sem fios. Estes dispositivos desempenham o papel de mediadores entre os diversos elementos IoT presentes na camada física, agregando, filtrando e transmitindo dados de e para esses elementos.

A camada de aplicação inclui todo o *software* necessário para oferecer um serviço específico. Neste nível, os dados provenientes das camadas inferiores são filtrados e processados com recurso, por exemplo, a ferramentas de análise e armazenados em bases de dados (Ex.: *Cloud*). Estas ferramentas permitem reduzir a necessidade de processamento local nos dispositivos IoT. Posteriormente, os dados são disponibilizados a aplicações IoT ou *dashboards* por onde o utilizador final pode interagir.

Em IoT, as tecnologias sem fios assumem particular importância. Em comparação com os que requerem uma ligação física, os dispositivos sem fios podem ser instalados em ambientes de difícil acesso, uma vez que necessitam de menos recursos materiais e humanos para a sua instalação. Além disso, em uma rede de sensores sem fios, os diversos nós podem ser adicionados ou removidos com relativa facilidade, e a sua localização pode ser alterada sem necessidade de reavaliar a estrutura de toda a rede [11]. No próximo subcapítulo algumas destas tecnologias são abordadas.

2.3. Tecnologias Sem Fios

Os principais critérios relevantes na escolha de uma tecnologia de comunicação sem fios consistem no débito binário, alcance, largura de banda e consumo energético, o que permite a sua divisão em três categorias [12]:

- **Wireless Personal Area Network (WPAN)**: baixo consumo de energia e baixo alcance, Ex.: Bluetooth e ZigBee.
- **Wireless Local Area Network (WLAN)**: consumo mais elevado, comparando com as restantes categorias, médio alcance e alto débito, Ex.: Wi-Fi.
- **Low Power Wide Area Network (LPWAN)**: baixo consumo e débito e longo alcance, Ex.: LoRa, SigFox e NB-IoT.

No contexto desta dissertação, as redes LPWAN possuem uma maior relevância, pelo que são o foco desta seção.

2.3.1. LoRa/LoRaWAN

LoRa é uma tecnologia proprietária desenvolvida pela empresa *Semtech* [13]. Sendo parte do grupo de redes LPWAN, caracteriza-se como uma tecnologia de comunicação sem fios de longo alcance, baixo custo, com baixo consumo energético e uma largura de banda que pode tomar os valores de 125, 250 ou 500 kHz [14]. É considerado um protocolo aberto uma vez que qualquer organização ou particular pode adquirir equipamentos LoRa e implementar a sua própria rede independentemente. Utiliza a modulação derivada de *Spread Spectrum* (SS) designada *Chirp Spread Spectrum* (CSS) que, aliada a diferentes *Spreading Factors* (SF) e largura de banda, permite ajustar o alcance com base na aplicação pretendida, em detrimento do débito binário. Inclui um esquema de correção de erros, denominado *Code Rate* (CR), que melhora a robustez do sinal transmitido, adicionando uma certa imunidade a interferências. Permite transmissão bidirecional de mensagens em tramas com dimensões que podem variar entre os 19 e 250 bytes [15][16].

LoRa utiliza as bandas de rádio não licenciadas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) de 433,868 e 915 MHz. No caso específico de Portugal, foram atribuídas as gamas de frequência EU433, entre os 433,05 e 434,79 MHz, e EU863-870, entre os 863 e 870 MHz [17].

Em termos do modelo das camadas de comunicação, a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN, por definição, estão estruturados em 3 camadas: a camada física, camada de ligação e camada de aplicação. A camada física é constituída pela tecnologia LoRa, e é responsável pela comunicação rádio e modulação de sinal. A camada de ligação contém a categorização de dispositivos em classes e a implementação do protocolo LoRaWAN. Por fim,

a camada de aplicação representa todas as aplicações que podem ser realizadas com recurso ao protocolo LoRaWAN [18].

Na Figura 2.9 encontra-se ilustrado a organização em camadas mencionada anteriormente.

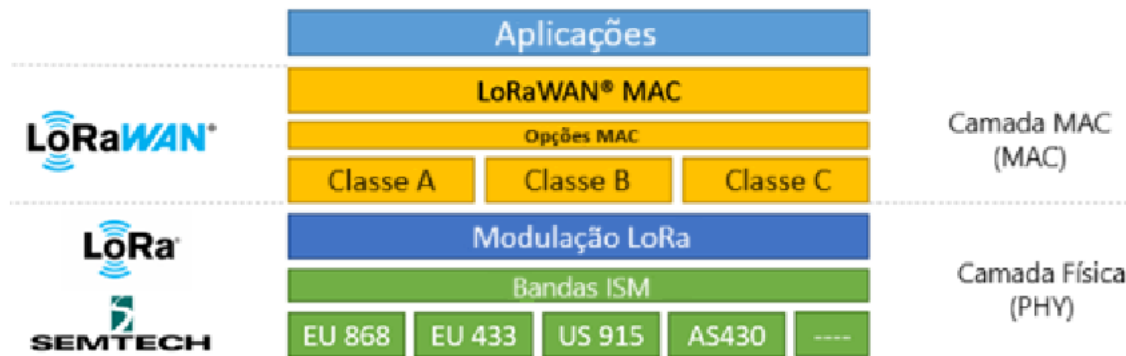


Figura 2.9 - Modelo de camadas Lora/LoRaWAN (adaptado de [18]).

LoRaWAN é um protocolo *open source* de controlo de acesso intermédio, *Medium Access Control* (MAC), desenhado e mantido pela *LoRa Alliance* [19] que permite operar sobre a camada física LoRa. Tem como principal objetivo desempenhar a função de protocolo de rede, embora seja também responsável por gerir o débito binário, frequências de comunicação e potências de emissão para todos os nós ligados à rede [20].

Outra característica de um sistema que implemente o protocolo LoRaWAN é o facto de este estar sujeito tempos de *duty-cycle*. Esta característica limita o tempo durante o qual um dispositivo pode ocupar um canal para transmitir dados. Por exemplo, se a cada 10 segundos se transmitir durante um período de 2 segundos, isto representa um *duty-cycle* de 20% [21].

O valor de *duty-cycle* está definido consoante a região e a sub-banda. Como exemplo, na Europa, a banda de frequência EU863-870 está dividida nas seguintes sub-bandas com *duty-cycle* distintos [21]:

- **K** (863 MHz - 865 MHz): 0.1%
- **L** (865 MHz - 868 MHz): 1%
- **M** (868 MHz – 868,6 MHz): 1%
- **N** (868,7 MHz – 869,2 MHz): 0.1%
- **P** (869,4 MHz – 869,65 MHz): 10%
- **Q** (869,7 MHz - 870 MHz): 1%

Uma rede LoRaWAN utiliza uma topologia em estrela e é composta pelos elementos presentes na Figura 2.10.

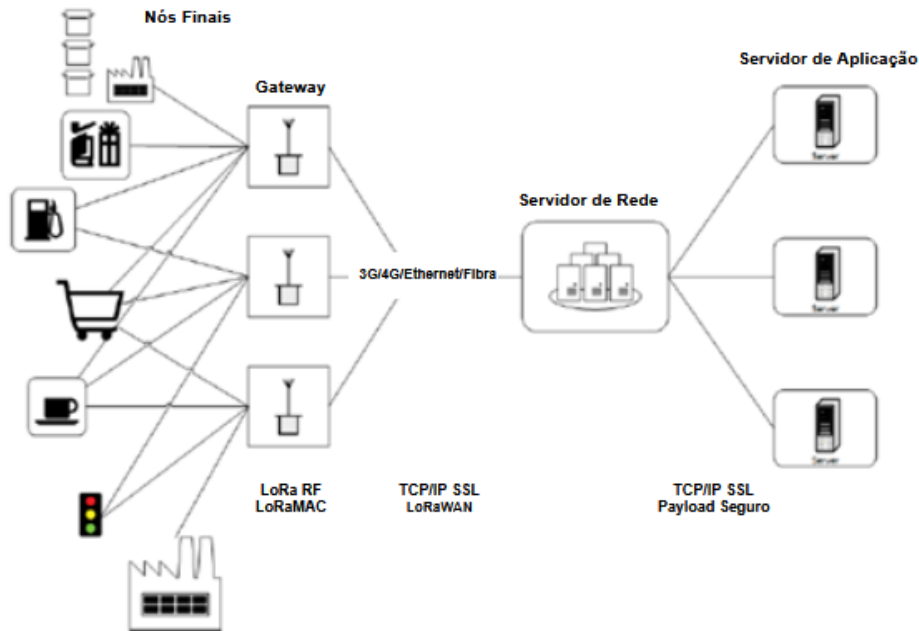


Figura 2.10 – Arquitetura de rede LoRaWAN (adaptado de [22]).

- **Nó Final:** Sensores e atuadores que enviam e recebem dados, através de um módulo rádio, para as *gateways* utilizando modulação LoRa.
- **Gateway:** Transceptor que recebe os dados provenientes dos diferentes nós encaminhando-os para os servidores de rede LoRaWAN através da rede celular, Wi-Fi, *Ethernet* ou fibra ótica.
- **Servidor de rede:** Servidor responsável por gerir toda a rede LoRaWAN em que está inserido. Entre outras, tem como principais funções estabelecer uma ligação segura *end-to-end*, através do algoritmo de encriptação *Advanced Encryption Standard (AES)*, entre o nó final e o servidor de aplicação, havendo a possibilidade de mais que uma *gateway* receber mensagens do mesmo nó, o servidor de rede ignora mensagens duplicadas e seleciona a melhor *gateway* para envio de futuras mensagens em *downlink*, otimização de débito binário, avaliação da autenticidade de dispositivos e integridade de mensagens.
- **Servidor de aplicação:** Servidor que processa os dados provenientes dos nós finais recebidos através do servidor de rede [21].

Dentro do protocolo são definidas três classes de dispositivos: Classe A, Classe B e Classe C. Todos os dispositivos LoRaWAN têm de implementar a Classe A, enquanto as restantes classes são uma extensão das especificações dos dispositivos de Classe A. Estas classes representam diferentes compromissos entre latência na receção de mensagens em *downlink* e o consumo energético dos dispositivos finais, estando o seu funcionamento representado na Figura 2.11.

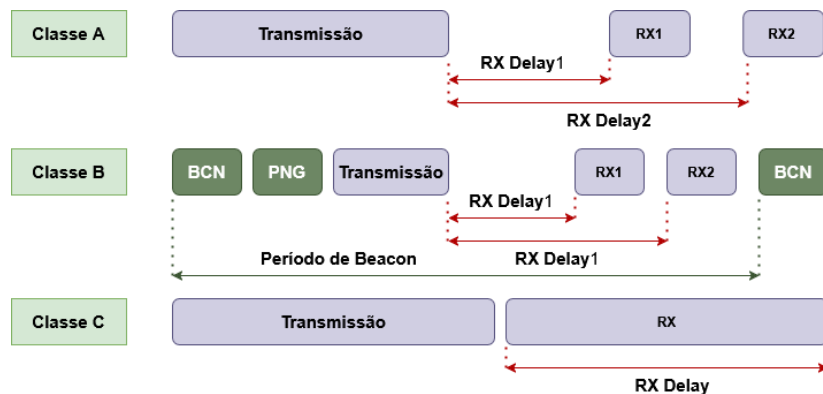


Figura 2.11 - Janelas de receção/transmissão das diferentes classes de dispositivos (adaptado de [23]).

A Classe A permite comunicação bidirecional entre um nó final e o servidor de rede. Nesta classe, a transmissão de *downlink* só pode ocorrer após uma transmissão de *uplink*. A Classe B implementa todas as características da Classe A, mas possui janelas de receção adicionais em momentos temporais calendarizados. Por outro lado, a Classe C permite transmissões em *downlink* a qualquer momento, exceto quando o dispositivo final está a transmitir. Os dispositivos finais Classe C consomem mais energia para operar, mas oferecem a menor latência em comparação com os dispositivos Classe A e B [21].

2.3.2. NB-IoT (Narrow Band – Internet of Things)

NB-IoT é uma tecnologia IoT desenvolvida pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* como parte da Release 13. Embora esteja integrada na norma do *Long Term Evolution (LTE)* é considerada um novo tipo de comunicação sem fios. Sendo uma tecnologia desenhada para aplicações de IoT, a sua arquitetura é mantida o mais simples possível de modo a minimizar o consumo de energia, tendo sido removidas algumas funcionalidades do LTE como o *handover*, monitorização da qualidade de canal e agregação de portadoras. Utiliza a modulação *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* e, ao ser parte da norma LTE, o NB-IoT utiliza a mesma banda de frequência que este, o que implica licenciamento de espetro [24].

Uma característica importante desta tecnologia é a sua implementação em uma largura de banda de 200 kHz utilizada nas redes *Global System for Mobile Communications* (GSM), possibilitando assim um maior o número de opções de implementação dentro da gama de espectro licenciado. Como resultado, uma única portadora NB-IoT possui uma largura de banda útil de 180 kHz (os 20 kHz restantes são utilizados como bandas de guarda), o que é equivalente a um *Physical Resource Block* (PRB) em LTE [25]. Assim, com as características apresentadas anteriormente, uma rede NB-IoT pode ser implementada em 3 modos de operação distintos ilustrados na Figura 2.12.

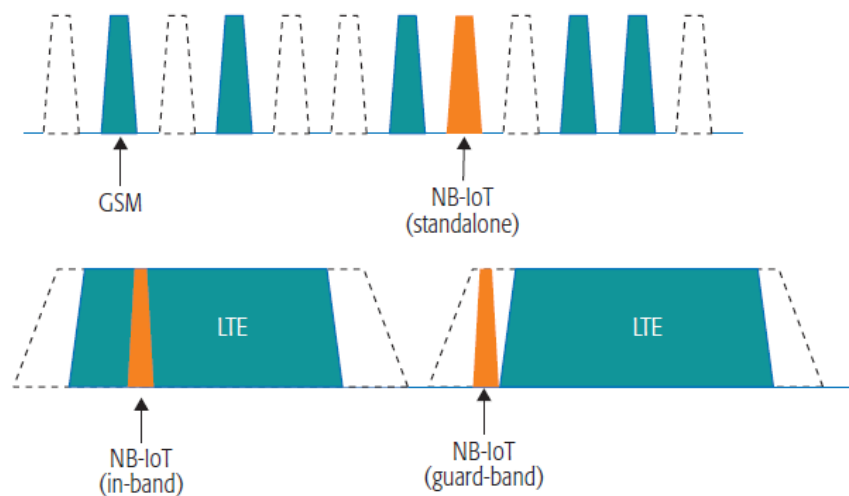


Figura 2.12 - Modos de operação do NB-IoT (retirado de [25]).

- **Operação Standalone:** Neste modo de operação, NB-IoT é tipicamente implementado em uma ou mais portadoras anteriormente utilizadas em GSM. Toda a potência de transmissão disponível na estação base pode ser utilizada.
- **Operação In-band:** Tal como o nome indica, neste modo o NB-IoT é implementado dentro da portadora LTE sendo-lhe alocado uma quantidade de PRBs. A potência de transmissão tem de ser partilhada entre as duas tecnologias.
- **Operação em banda de guarda:** PRBs não utilizados por se situarem na banda de guarda da portadora LTE podem ser reaproveitados para implementação de NB-IoT. A potência de transmissão continua a ser partilhada entre LTE e NB-IoT, no entanto, neste modo de operação, é geralmente esperado menos interferência, comparando com a operação *in-band*, uma vez que a portadora LTE interferente só se encontra em um dos lados da portadora NB-IoT [25].

Inicialmente, depois de implementada, uma rede NB-IoT suportava débitos binários de 21 kbit/s em *downlink* e 62,5 kbit/s em *uplink* e uma cobertura máxima, em ambiente rural, de 10 km. Com o Release 14, além de se adicionar capacidade de mobilidade aos dispositivos NB-IoT, que era muito limitada anteriormente, viu-se um acréscimo nos débitos binários para 120 kbit/s em *downlink* e 160 kbit/s em *uplink* [26].

2.3.3. SigFox

A tecnologia SigFox, lançada no ano de 2010, foi o primeiro protocolo de rede LPWAN, exclusivamente dedicado a comunicações *Machine To Machine* (M2M) e IoT. Foi projetada para interligar dispositivos e sensores com segurança, baixo custo e energeticamente eficiente. Atualmente a rede expande-se por todo o globo estando presente em mais de 70 países [15][27].

SigFox tem uma arquitetura baseada em *cloud*, semelhante à rede LoRaWAN, onde um dispositivo IoT usa o protocolo SigFox para transmitir dados para a estação base, sendo estes depois enviados, através de rede *Internet Protocol* (IP), para os servidores centrais. Após este processo, o utilizador final pode aceder aos dados depois de implementar um sistema de *callbacks* que redirecionará os dados para a máquina do utilizador [15][22][28].

A comunicação entre os dispositivos IoT e a estação base é feita com recurso à modulação *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) em canais com uma banda de apenas 100 Hz e, tal como a tecnologia LoRa, opera nas frequências de espectro não licenciado como os 868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia. Ao usar uma largura de banda tão curta, a tecnologia SigFox possui baixos níveis de ruído, levando a um baixo consumo energético, alta sensibilidade e antenas de baixo custo em detrimento de altos débitos binário uma vez que este fica limitado a 100 bit/s. Inicialmente a tecnologia suportava unicamente comunicação em *uplink*, tendo mais tarde evoluído para suportar bidirecionalidade, embora de forma muito limitada, uma vez que a comunicação em *downlink*, ou seja, o envio de dados da estação base para o dispositivo IoT, só pode ocorrer após uma ligação *uplink* [29]. Diariamente, em *uplink*, o número de mensagens transmitidas está limitado a um máximo de 140 com um *payload* de 12 bytes enquanto, em *downlink*, o máximo é de 4 mensagens com um *payload* de 8 bytes. Tendo em conta o cabeçalho, os pacotes podem atingir um máximo de 26 bytes de dimensão [15]. Cada mensagem em *uplink* é transmitida 3 vezes, por definição, em canais distintos. Para este efeito, na Europa por exemplo, a faixa entre 868,180 MHz e 868,220 MHz está dividida em 400 canais de 100 Hz, ortogonais entre si [29].

A potência de emissão dos dispositivos que tiram partido da tecnologia SigFox varia entre os 10 e 25 mW na Europa, o que lhes permite alcançar uma autonomia de vários anos. As estações base possuem uma sensibilidade de cerca de -142 dBm, resultando em um *link*

budget de até 160 dB, favorável para comunicações a longas distâncias que podem chegar a 40 km em ambiente rural e 10 km em ambiente urbano [15][29].

2.3.4. Comparação de Tecnologias

Diversos fatores devem ser considerados ao escolher uma tecnologia LPWAN adequada para uma aplicação IoT. Esses fatores são a qualidade de serviço, mais conhecida por *Quality of Service* (QoS), consumo energético, escalabilidade, dimensão do *payload*, cobertura, débito binário, latência e custo. Neste subcapítulo as tecnologias Sigfox, LoRa/LoRaWAN e NB-IoT são comparadas em termos dos fatores previamente mencionados e das suas diferenças técnicas presentes na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Características de diferentes tecnologias LPWAN (adaptado de [29]).

	SigFox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulação	BPSK	CSS	QPSK
Banda de frequência	ISM	ISM	LTE
Largura de banda	100 Hz	125/250/500 kHz	180 kHz
Débito binário máximo	100 bit/s	50 kbit/s	160 kbit/s (UL), 120 kbit/s (DL)
Dimensão max. de msg	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	250 bytes	1600 bytes
Bidirecionalidade	Limitada / Half-Duplex	Sim / Half-Duplex	Sim / Half-Duplex
Mensagens/dia	140 (UL), 4 (DL)	Limitado por duty-cycle	Ilimitado
Cobertura	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Imunidade a interferência	Alta	Alta	Baixa
Autenticação e Encriptação	Não	Sim (AES-128)	Sim (LTE)
Implementação de redes privadas	Não	Sim	Não

Qualidade de Serviço

Sigfox e a LoRa utilizam a banda de espectro não licenciado e protocolos de comunicação assíncronos, sendo tecnologias mais robustas contra interferência e desvanecimento. No entanto, não são capazes de oferecer a QoS que o NB-IoT atinge. A tecnologia NB-IoT utiliza espectro licenciado e um protocolo síncrono baseado em LTE, garantindo uma QoS elevada à

custa do aumento de custos [29]. Devido ao compromisso entre a QoS e o custo, o NB-IoT é preferível para aplicações que exigem uma boa qualidade de serviço, enquanto as aplicações que não têm esta limitação podem optar por LoRa ou Sigfox.

Consumo Energético

Sendo as tecnologias em análise projetadas maioritariamente para aplicações IoT, os dispositivos presentes nos nós finais passam maior parte do tempo em *sleep mode*, o que reduz a quantidade de energia consumida e prolonga o tempo de vida dos dispositivos. No entanto, um dispositivo final NB-IoT consome energia adicional devido à comunicação síncrona e à necessidade de garantir uma QoS elevada, o que reduz a sua vida útil em comparação com Sigfox e LoRa [29].

Escalabilidade e Payload

O suporte de um grande número de dispositivos é uma das características do Sigfox, LoRa e NB-IoT. No entanto, NB-IoT oferece uma escalabilidade superior suportando até 100 mil dispositivos finais por célula, em comparação com 50 mil suportados pelo Sigfox ou LoRa [29]. A tecnologia NB-IoT também lidera no que diz respeito à dimensão do *payload*. Como apresentado na Tabela 2.2, NB-IoT permite a transmissão de até 1600 bytes em uma única mensagem, seguido pelo LoRa, que permite o envio de um máximo de 250 bytes de dados. Em último, a tecnologia Sigfox possui o *payload* com dimensão mais baixa de apenas 12 bytes em *uplink*.

Cobertura

LoRa e Sigfox fornecem uma cobertura de longo alcance que pode chegar a 20 e 40 km, respetivamente, o que a torna estas tecnologias adequadas para áreas rurais e remotas. Como exemplo, um país como a Bélgica, com uma área de aproximadamente 30500 km², possui uma infraestrutura SigFox onde são necessárias apenas 7 estações base para cobrir a totalidade do país. Utilizando LoRa, a cidade de Barcelona, com cerca de 100 km², utiliza somente 3 *gateways* [29]. Já o NB-IoT funciona com base em uma arquitetura de rede celular, o que limita a sua cobertura a raios que, geralmente, não excedem os 10 km em áreas rurais e 1 km em áreas mais urbanas, levando a uma densidade de estações bases consideravelmente superior comparado com as restantes tecnologias.

Débito Binário e Latência

Avaliando o débito binário de cada tecnologia observa-se uma diferença considerável entre as mesmas, com o NB-IoT a destacar-se ao oferecer uma taxa de dados que pode chegar aos 160 kbit/s em *uplink*. A tecnologia LoRa consegue obter um débito máximo de cerca de 50 kbit/s. Com um débito de apenas 100 bit/s, SigFox apresenta-se como a tecnologia com a

taxa de dados mais baixa. Da mesma forma, NB-IoT tem também como vantagem o facto de possuir baixa latência [29]. Para também lidar com mensagens de baixa latência, a tecnologia LoRa implementa os dispositivos de classe C, à custa de um maior consumo de energético. Em conclusão, para aplicações que não são sensíveis a latência e não possuem grande quantidade de dados a ser enviados, Sigfox e LoRa classe A são as melhores opções. Para aplicações que exigem baixa latência, NB-IoT e LoRa classe C possuem mais vantagens.

Custo

O NB-IoT, que opera no espectro licenciado, tira partido da infraestrutura de redes móveis existente, o que reduz os custos iniciais de implementação. Contudo, os custos operacionais são substancialmente elevados, dado que as operadoras impõem tarifas mensais pelo uso do espectro licenciado e pela transmissão de dados, tornando a tecnologia em uma solução de elevado custo a longo prazo. O LoRa, por sua vez, utiliza espectro não licenciado, permitindo a criação de redes privadas com custos iniciais moderados, associados à aquisição de *gateways* e dispositivos. No entanto, os custos operacionais são quase nulos, uma vez que não exige pagamentos recorrentes para a sua utilização. O Sigfox, também em espectro não licenciado, emprega uma rede proprietária que apresenta custos iniciais reduzidos, mas exige assinaturas mensais de valores inferiores aos do NB-IoT [29].

Na Figura 2.13 está presente um gráfico resumo, comparando os fatores previamente abordados.

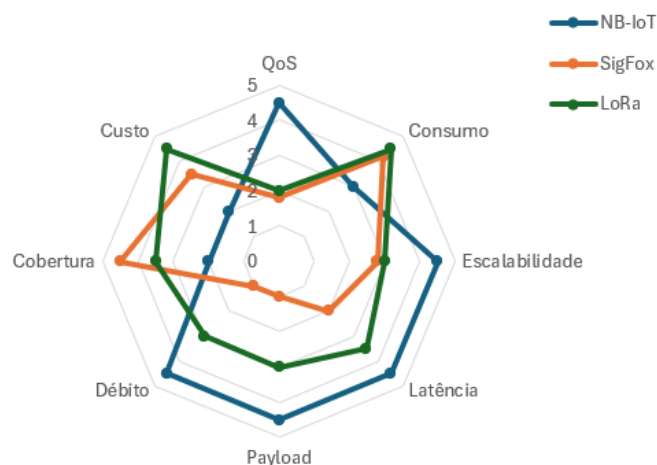


Figura 2.13 - Comparação de tecnologias LPWAN em termos de fatores IoT.

2.4. Trabalhos Relacionados

Esta secção oferece uma revisão de trabalhos relacionados, examinando sistemas que utilizam diferentes abordagens para a recolha, análise e monitorização de eventos sísmicos, sendo discutidas as tecnologias e metodologias que sustentam essas soluções.

O projeto QuakeSense [30] é um sistema de monitorização sísmica e ambiental *open-source* baseado na tecnologia LoRa/LoRaWAN. Este sistema é composto por uma rede de sensores alimentados por energia solar e uma *gateway* de um canal desenvolvida pelos autores.

O nó final consiste em um microcontrolador STM32 integrado com um transceiver LoRa, módulo de GPS e uma placa de sensores que inclui um acelerómetro de três eixos, sensores de pressão, temperatura e humidade. Estes componentes são alimentados por uma bateria de 2000 mAh recarregável através de uma célula fotovoltaica.

O sistema transmite dois tipos de mensagens:

- *Environmental Data Packet* (EDP), contendo 33 bytes de informações ambientais, enviado a cada 15 minutos.
- *Earthquake Alert Message* (EAM), alerta de possível atividade sísmica, enviado apenas quando um limiar de vibração é ultrapassado, com dimensão de 105 bytes.

Os autores realizaram uma série de testes para avaliar o consumo energético e diferentes parâmetros de qualidade da rede. Em modo de baixo consumo, o dispositivo consome 100 mA, enquanto no modo de operação completa, o consumo aumenta para 319 mA. Estimou-se que a bateria oferece 20 horas de operação sem energia solar e até 38 horas com suporte fotovoltaico. Em termos de qualidade de rede, foram avaliados o *Packet Delivery Ratio* (PDR) e a latência do sistema. Os testes efetuados mostraram que uma largura de banda de 125 ou 250 kHz conduz a um PDR superior a 90% para os pacotes EDP, de dimensão mais pequena, enquanto no caso dos pacotes EAM, de maior dimensão, não é inferior a 73%. Em particular, outro resultado significativo é o facto de, fixando a largura de banda, BW, a 250 kHz e *Code Rate*, CR, a 4/8, o PDR ser igual a 100% para ambos os pacotes independentemente do fator de espalhamento, SF, ao passo que, se CR = 4/5, apenas com SF = 7 observam-se perdas. Para BW = 500 kHz, de maneira a aumentar o PDR, observou-se que é necessário aumentar o SF e/ou o CR. Verificou-se também que, para pacotes de maior dimensão, o PDR tem tendência a ser inferior. Para a latência, o sistema demonstrou uma tendência em apresentar valores em torno de 4 s, com a única exceção a ser a configuração com BW = 125 kHz. Nesse caso, foi medido pelos autores que, quando o SF aumenta, a latência também aumenta numa medida de 50%, independentemente do CR. Em adição, o valor máximo de latência, para BW = 125 kHz, foi cerca de 12 s, enquanto o valor médio foi igual a 5,47 s.

Apesar de promissor, o projeto apresenta limitações, como o consumo energético elevado e alcance testado relativamente curto (822 m), tendo em conta a tecnologia utilizada. Testes para distâncias superiores e com múltiplos nós foram sugeridos como trabalho futuro.

O sistema de alerta precoce de terremotos *P Alert* [31], desenvolvido pela Universidade Nacional de Taiwan (NTU), utiliza acelerómetros MEMS de baixo custo para detetar e reagir rapidamente a eventos sísmicos. O sistema é constituído por 506 estações distribuídas por Taiwan, que transmitem dados através de TCP/IP para o centro de processamento da NTU até 15 s após a ocorrência.

Este sistema deteta ondas P, tirando partido do algoritmo *Short-Term-Average/Long-Term-Average* (STA/LTA), e emite alertas sonoros locais 2 a 3 s após a sua deteção. Também gera mapas de magnitude detalhados 1 a 2 min após o evento, permitindo identificar as áreas mais afetadas e as direções de propagação do terremoto.

Durante dois anos de operação, o sistema registou cinco terremotos com magnitude superior a 5,5 na escala de *Richter*, apresentando um desvio médio de 10,4 km na localização do epicentro e diferença de 0,2 pontos na magnitude em relação aos dados fornecidos pela agência meteorológica *Central Weather Bureau*.

Os sistemas de monitorização sísmica tradicionais dependem de redes sísmicas e geodésicas disponíveis apenas em alguns países ou regiões, deixando vastas áreas vulneráveis sem cobertura. O projeto *MyShake* [32] surge como uma solução para este problema, utilizando os acelerómetros presentes nos *smartphones* atuais para detetar eventos sísmicos.

O projeto tem como base uma aplicação Android que corre em segundo plano no *smartphone* do utilizador, monitorizando continuamente os dados do acelerómetro com o objetivo de detetar padrões associados a terremotos. Quando um movimento significativo é registado, a aplicação utiliza um algoritmo com base em uma rede neural artificial para determinar se a atividade pode ser atribuída a um evento sísmico. Os dados são então enviados para um Centro de Processamento Centralizado (CPC), onde são analisados em conjunto com os dados de outros dispositivos na região. Estes dados são categorizados em dois tipos: primeiro a informação de *trigger*, que inclui o momento da deteção, localização do *smartphone* e a amplitude máxima das 3 componentes de aceleração, e segundo, a informação que contém a amplitude das 3 componentes de aceleração desde 1 min antes da deteção até 4 min depois. Este último possui um nível de prioridade inferior sendo só enviado quando o dispositivo está ligado à rede Wi-Fi e à rede elétrica.

No CPC, os dados provenientes de vários dispositivos são analisados, sendo um evento sísmico declarado se pelo menos 60% dos *smartphones* em um raio de 10 km detetarem atividade anormal, reduzindo desta forma a probabilidade de falsos positivos. Com base nos

mesmos dados é determinado o epicentro e magnitude do terremoto e gerado alertas que serão enviados para todos os dispositivos nas proximidades da área atingida.

O desempenho do projeto *MyShake* foi avaliado com dados de terremotos reais e simulados demonstrando que:

- *Smartphones* podem detectar terremotos de magnitude 5,0 a uma distância de até 10 km.
- Para magnitudes superiores, a sensibilidade do sistema aumenta, permitindo detecções a distâncias superiores.
- Os algoritmos identificam com precisão 98% dos eventos dentro de um raio de 10 km do epicentro.

Os autores concluem que os resultados demonstram que os *smartphones* são instrumentos capazes de registrar eventos sísmicos, especialmente considerando os avanços contínuos na qualidade dos sensores. No entanto, algumas limitações foram identificadas tais como a dependência em uma densa rede de dispositivos para obtenção de dados precisos e à sensibilidade, por vezes não ideal, dos acelerômetros utilizados nos *smartphones* atuais. Como perspectivas de trabalho futuro, os autores planeiam integrar o projeto em redes sísmicas tradicionais para melhorar a precisão de alertas, incorporar outros sensores presentes em *smartphones* para estimativas de magnitude mais robustas e fornecer dados detalhados para pesquisa científica, contribuindo para uma melhor compreensão de eventos sísmicos.

Ao longo dos anos, têm sido desenvolvidas abordagens inovadoras para identificar eventos sísmicos através da análise do campo magnético terrestre, recorrendo a dados obtidos por satélites. Um estudo relevante nesta área foi conduzido por [33], no qual foi analisado o comportamento do campo magnético antes de um evento sísmico, com recurso a dados de satélites *Swarm*. A investigação centrou-se em 1077 sismos de magnitude superior a 5.0 ocorridos entre 2014 e 2023 na zona sísmica Alpino-Himalaia. Os autores aplicaram um algoritmo automático para identificar anomalias magnéticas registadas nos 10 dias que antecederam cada evento. Os resultados indicaram que 83,5% dos sismos apresentaram anomalias magnéticas prévias, com uma forte correlação entre a duração das anomalias e a magnitude dos sismos.

Estudos anteriores, como em [34], já sugeriam que os desenvolvimentos de anomalias magnéticas podiam estar relacionados com alterações nas propriedades de rochas, devido ao stress e à acumulação de energia característica dos momentos que antecedem um sismo. Este estudo mais recente reforça esta ideia, estabelecendo uma relação logarítmica entre a magnitude e a duração das anomalias.

Com base nos resultados do estudo, foram realizados testes para a implementação de um Sistema Operacional de Previsão de Sismos, dos quais se obtiveram resultados significativos em comparação com implementações anteriores. No entanto, registou-se uma percentagem de falsos alarmes de 37%, que correspondem à deteção de anomalias que não resultaram em eventos sísmicos, bem como a ocorrência de sismos sem anomalias prévias, que consequentemente, não foram detetados.

Estes avanços na monitorização remota do campo magnético terrestre sugerem que a utilização de satélites *Swarm* ou métodos semelhantes podem ter um papel significativo na previsão de sismos, quando integrados com outros sistemas de previsão sísmica. No entanto, desafios como a elevada percentagem de falsos positivos e a necessidade de validação adicional permanecem, exigindo mais investigação para a implementação eficaz de um sistema preditivo fiável.

falta uma tabela a sumarizar as características mais relevantes de cada trabalho
devia separar os trabalhos relacionados para se identificarem melhor
esta parte peca por ser muito descritiva e ter pouca análise crítica.

3. Aspectos Técnicos da Tecnologia LoRa/LoRaWAN

Este capítulo apresenta um conjunto de aspectos técnicos fundamentais da tecnologia LoRa/LoRaWAN, com o objetivo de fornecer uma visão clara sobre o seu funcionamento e características essenciais. Em primeiro lugar, descreve-se a modulação LoRa, baseada em CSS. Seguidamente, abordam-se mecanismos de segurança, com destaque para os diferentes métodos de ativação dos dispositivos finais. Por fim, analisa-se a estrutura de uma mensagem LoRaWAN, de modo a compreender a organização dos seus campos e a forma como a informação é transportada na rede.

3.1. Modulação LoRa

A modulação LoRa utiliza uma técnica de espalhamento espectral denominada *Chirp Spreading Spectrum*. Esta técnica tem características que levam a um elevado ganho de processamento e elevada resistência a fenómenos de multi-percurso, *jamming*, efeito de *Doppler* e interferência [16].

A modulação CSS consiste na variação linear da frequência do sinal transmitido ao longo do tempo. O aumento linear da frequência é designado por *up-chirp*, enquanto o processo inverso é denominado *down-chirp*. A Figura 3.1 apresenta uma representação gráfica dessa variação.

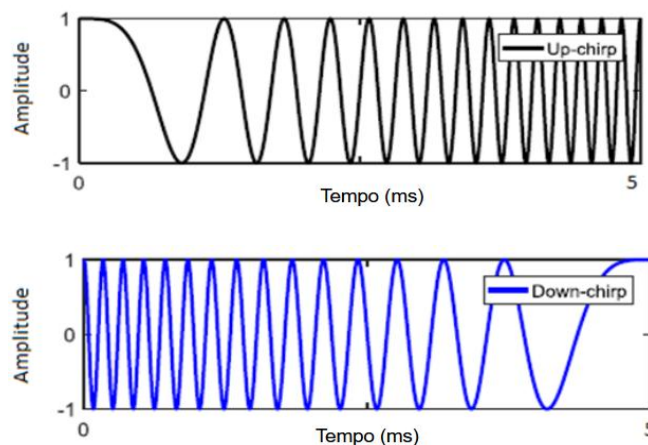


Figura 3.1 - Representação de um *up-chirp* e *down-chirp* no domínio do tempo (adaptado de [35]).

Para facilitar a análise dos *chirps*, recorre-se frequentemente a uma representação em espectrograma. A Figura 3.2 mostra, em simultâneo, o espectrograma de um *up-chirp* e de um *down-chirp*.

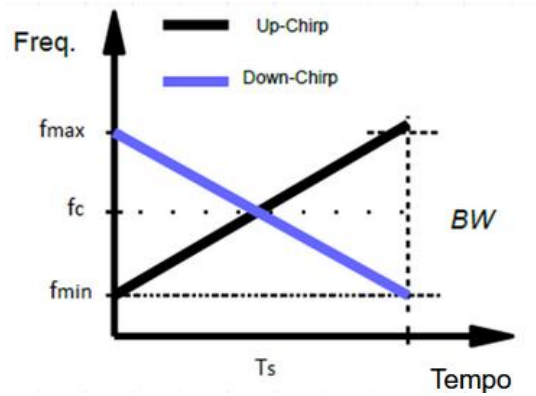


Figura 3.2 - Espectrograma de um up-chirp e down-chirp (adaptado de [35]).

Na Figura 3.2 verifica-se também que a largura de banda, BW , pode ser expressa pela Equação (3.1):

$$BW = f_{max} - f_{min} [Hz] \quad (3.1)$$

Desta forma, considera-se que um *chirp* é completo sempre que se realiza o varrimento de todas as frequências contidas na largura de banda definida.

A inclinação de um *chirp* ou seja, o tempo que é necessário para ser realizado o varrimento, depende do fator de espalhamento e da largura de banda, como demonstrado pela Equação (3.2). Um SF mais elevado resulta em *chirps* com uma maior duração, enquanto um SF mais baixo resulta em *chirps* com uma duração menor.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} [s] \quad (3.2)$$

O fator de espalhamento também representa o número de bits codificados em cada símbolo e pode assumir valores de 7 a 12 bits. Assim, o número total de símbolos, M , necessários para representar SF bits é dado pela Equação (3.3):

$$M = 2^{SF} \quad (3.3)$$

O valor 2^{SF} indica também o número de *chips* por símbolo. O termo *chip* representa o número de valores possíveis de codificar para um dado número de bits SF . O total de 2^{SF} *chips* existentes formam um símbolo.

Desta forma, os diferentes símbolos são formados por ciclicamente incrementar a frequência (número de *chip*) em que um *up-chirp* se inicia. Na Figura 3.3 estão presentes os símbolos que codificam os números 32 e 64 utilizando um $SF=7$, o que corresponde a um total de 128 *chips* por símbolo.

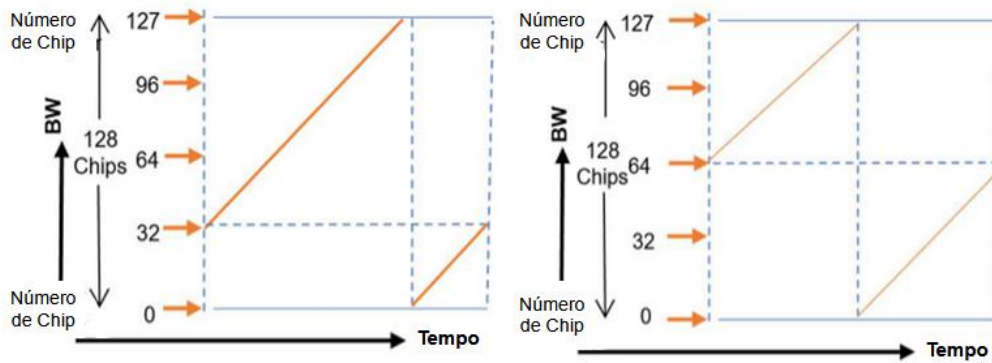


Figura 3.3 - Símbolos CSS para SF = 7 (adaptado de [36]).

Como mencionado anteriormente, um *chirp* é considerado completo quando percorre todas as frequências dentro da largura de banda BW. Ao iniciar cada símbolo em frequências distintas, ocorre um “salto” da frequência máxima para a frequência mínima, de forma a incluir no varrimento as frequências abaixo da frequência inicial. Esta descontinuidade manifesta-se em posições diferentes consoante o valor binário representado, e constitui a principal característica que diferencia os vários símbolos.

O ritmo de símbolo, R_s , depende do fator de espalhamento e largura de banda utilizada e é calculado pela Equação (3.4) :

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ [simb/s]} \quad (3.4)$$

Como cada símbolo possui SF bits, é possível calcular o ritmo binário de modulação pela Equação (3.5):

$$R_{bm} = R_s * SF = \frac{BW}{2^{SF}} * SF \text{ [bit/s]} \quad (3.5)$$

A modulação LoRa inclui um esquema de deteção de erros, pelo que existe bits redundantes que não contribuem para o débito binário de informação útil. O débito binário útil é dado pela Equação (3.6):

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{4 + CR} \text{ [bit/s]} \quad (3.6)$$

Onde:

- SF , fator de espalhamento [7...12].
- BW , largura de banda [Hz].
- CR , *Code Rate*, (bits adicionais de redundância) [1...4].

Sendo que existe 2^{SF} chips por símbolo é possível calcular o ritmo de chip, R_c , através da Equação (3.7):

$$R_c = R_s * 2^{SF} = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} = BW \text{ [chip/s]} \quad (3.7)$$

Da equação acima conclui-se o ritmo de chip será sempre igual à largura de banda do canal. Por outras palavras significa que um chip é transmitido por segundo por Hz.

Em modulações que recorrem a técnicas de espalhamento de espectro, a relação entre o ritmo de chip e o débito binário é denominada como ganho de processamento, dado por:

$$G_p = 10 * \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right) \text{ [dB]} \quad (3.8)$$

No caso do CSS, a fórmula do ganho de processamento pode ser decomposta na Equação (3.9):

$$G_{pCSS} = 10 * \log_{10} \left(\frac{2^{SF}}{SF} \right) + 10 * \log_{10} \left(\frac{4 + CR}{4} \right) \text{ [dB]} \quad (3.9)$$

O ganho de processamento em LoRa está fortemente condicionado pelo fator de espalhamento. Como se observa na Equação (3.9), o ganho aumenta exponencialmente com SF, enquanto a contribuição do CR é menor em comparação. Isto significa que o SF é o principal parâmetro a influenciar o ganho de processamento. Em termos práticos, um SF mais elevado melhora a capacidade do recetor em detetar sinais de baixa potência, característica essencial para transmissões de longa distância.

Para ilustrar este efeito, a Figura 3.4 apresenta a variação do ganho de processamento em função do SF, mantendo o CR constante. É evidente que, à medida que o SF aumenta, o ganho de processamento apresenta um crescimento significativo, com um aumento de 2 a 3 dB por cada incremento de SF.

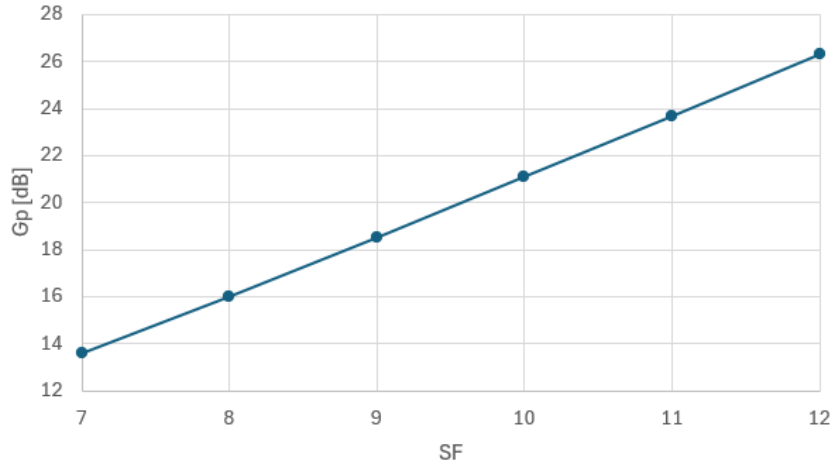


Figura 3.4 - Variação do ganho de processamento em função de SF, CR=4/5.

Este comportamento explica, em grande medida, a capacidade do LoRa em alcançar distâncias superiores em comparação com outras tecnologias de rádio, uma vez que o elevado ganho de processamento aumenta a sensibilidade do recetor e permite descodificar sinais em ambientes com elevada atenuação ou ruído.

Na Tabela 3.1 observa-se, segundo [16], a sensibilidade de um sistema LoRa para diferentes SF, utilizando uma potência de transmissão fixa.

Tabela 3.1 - Sensibilidade de um sistema LoRa para diferentes SF (adaptado de [16]).

SF	Sensibilidade (dBm)
7	-123
8	-126
9	-129
10	-132
11	-134.5
12	-137

Os dados acima corroboram o afirmado no parágrafo anterior, sendo visível um aumento gradual da sensibilidade à medida que o *Spreading Factor* é incrementado.

Por outro lado, como é visível na Figura 3.5, o aumento do SF tem um impacto negativo significativo no débito binário, o que reduz de forma acentuada a quantidade de dados que podem ser enviados por segundo.

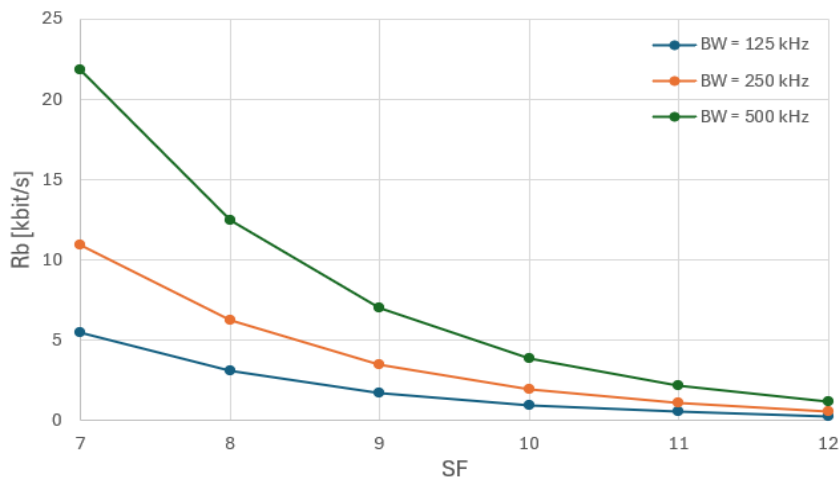


Figura 3.5 - Relação entre o débito binário e SF, CR=4/5.

3.2. Segurança

Para aplicar eficazmente modelos de segurança criptográfica, a utilização de chaves é indispensável. Para o efeito, muitos esquemas criptográficos podem ser implementados, como, por exemplo, a encriptação de chave simétrica. Para a implementação da encriptação simétrica, os dispositivos geram e partilham uma chave simétrica para comunicação. Esquemas de criptografia simétrica, como o *Advanced Encryption Standard* de 128 bits, são implementados em redes LoRaWAN para garantir segurança *end-to-end*. O algoritmo AES-128 garante, em grande parte, a integridade, autenticidade e confidencialidade na rede, de modo a assegurar que apenas os dispositivos autenticados possam comunicar [37].

O protocolo LoRaWAN usa uma chave de aplicação (AppKey) de 128 bits, gerada pelo servidor de rede, a partir da qual são derivadas mais duas chaves: a chave de sessão de rede (NwkSKey) e a chave de sessão de aplicação (AppSKey). Todas as chaves AppKey, NwkSKey e AppSKey são números hexadecimais de 128 bits [37].

No entanto, para que os dispositivos finais sejam reconhecidos em uma rede LoRaWAN, estes têm de passar por um processo de ativação. Esse processo pode ser feito de duas formas, denominadas *Over-The-Air-Activation* (OTAA) e *Activation By Personalization* (ABP).

3.2.1. Over-The-Air-Activation

Em OTAA cada dispositivo final é pré-configurado com três elementos: o DevEUI, que o identifica de forma única, o AppEUI, que o associa a uma aplicação específica, e a AppKey, partilhada apenas com o servidor de rede.

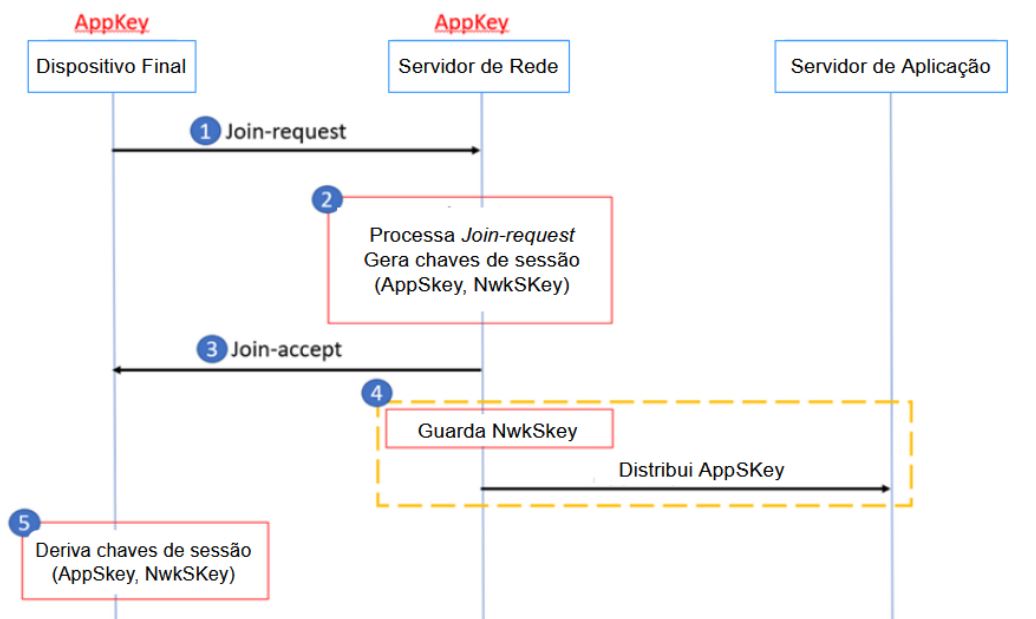


Figura 3.6 - Processo de ativação OTAA (adaptado de [21]).

Como demonstrado na Figura 3.6, o processo inicia-se quando o dispositivo envia uma mensagem *Join-request*, que inclui o DevEUI, AppEUI e um número aleatório de 2 bytes (DevNonce). Para garantir a integridade da mensagem, é calculado um *Message Integrity Code* (MIC) com base na AppKey. O servidor de rede valida a mensagem e rejeita qualquer pedido que contenha um DevNonce anteriormente utilizado.

Se a adesão for aceite, o servidor de rede gera as chaves de sessão (NwkSKey e AppSKey), distribui a AppSKey para o servidor de aplicação e envia ao dispositivo uma mensagem *Join-accept*, encriptada com a AppKey. Esta mensagem contém, entre outros campos, um número aleatório AppNonce, o identificador da rede NetID e o DevAddr que identifica o dispositivo final dentro da rede.

Após a receção, o dispositivo descripta a mensagem, deriva as chaves de sessão, a partir do AppKey e AppNonce, e armazena o DevAddr. A partir desse momento, a NwkSKey é utilizada para verificar a integridade de todas as mensagens trocadas com a rede, enquanto a AppSKey garante a confidencialidade dos dados entre o dispositivo e o servidor de aplicação [21].

3.2.2. Activation By Personalization

A ativação ABP liga diretamente um dispositivo final a uma rede pré-selecionada, não sendo assim necessário realizar um pedido de adesão como em OTAA. ABP é um método de ativação menos seguro e também tem a desvantagem de os dispositivos não poderem mudar de rede sem alterar manualmente as chaves previamente programadas.

O DevAddr e as duas chaves de sessão NwkSKey e AppSKey são armazenados diretamente no dispositivo final em detrimento do DevEUI, AppEUI e AppKey. Cada dispositivo deve ter um conjunto único de NwkSKey e AppSKey. Tanto o DevAddr como a NwkSKey são igualmente armazenados no servidor de rede e a AppSKey no servidor de aplicação.

Assim, um dispositivo final que recorre ao método ABP fica limitado a uma única rede e mantém a mesma sessão de segurança durante toda a sua vida útil [21].

3.3. Formato de Mensagem

O formato de mensagem em LoRa, presente na Figura 3.7, inclui os campos preâmbulo, PHDR, PHDR_CRC e PHY Payload, seguido de um *Cyclic Redundancy Check* (CRC) para deteção de erros. O CRC só está presente em mensagens de *uplink* [38].

Preâmbulo [n símbolos]	PHDR [2 byte]	PHDR_CRC [4 bits]	PHY Payload [Variável]	CRC [2 byte]
------------------------------	------------------	----------------------	---------------------------	-----------------

Figura 3.7 - Formato da mensagem LoRa em uplink (adaptado de [38]).

O preâmbulo é usado para sincronizar o recetor com o transmissor. Consiste em uma sequência de 8 símbolos conhecidos, 6 *up-chirps* e 2 *down-chirps*. Na Figura 3.8 encontra-se um espectrograma do início da transmissão de uma mensagem. Nesta é possível observar a sequência de símbolos presentes no preâmbulo.

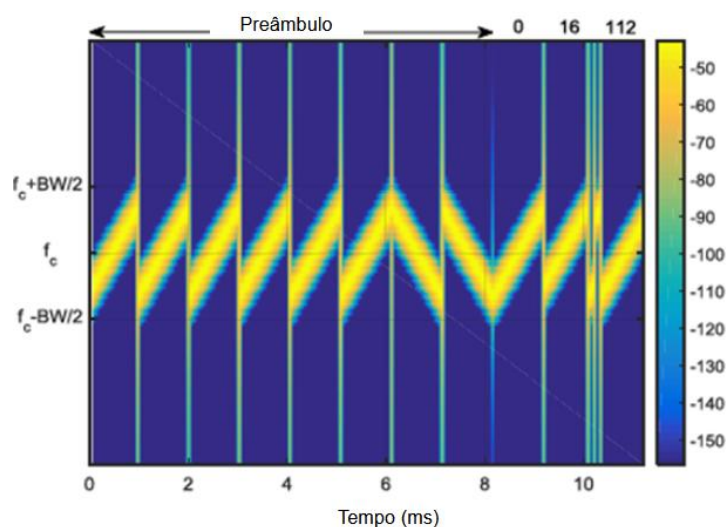


Figura 3.8 - Espectrograma do preâmbulo de uma mensagem LoRa (adaptado de [35]).

O campo PHDR contém informação referente à dimensão do campo PHY *Payload* e características do CRC. O PHDR_CRC tem presente um código de deteção de erros que atua sobre o campo PHDR. Por fim, o campo PHY *Payload* contém a informação útil a ser entregue às camadas superiores. O PHDR e o PHDR_CRC são codificados com um *Code Rate* de 4/8, enquanto PHY *Payload* e CRC podem utilizar um CR de 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8 [21].

É de salientar que a estrutura da mensagem apresentada anteriormente é utilizada no modo *Explicit Packet*. Existe um segundo modo, denominado *Implicit Packet Mode*, em que o tamanho do *payload*, CR e CRC são conhecidos antecipadamente. O conhecimento prévio destes dados torna o cabeçalho desnecessário (campos PHDR e PHDR_CRC) sendo removido do corpo da mensagem. O modo *Implicit Packet* é utilizado maioritariamente nos *beacons* necessários para dispositivos LoRaWAN Classe B.

O tempo de transmissão, também conhecido como *Time on Air* (ToA), de uma mensagem, é crucial em LoRa devido à necessidade de se respeitar as restrições de *duty-cycle*. Por [16] temos que o tempo de transmissão T_{packet} pode ser calculado através da Equação (3.10):

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} [s] \quad (3.10)$$

$T_{preamble}$ corresponde ao tempo de transmissão do preâmbulo e é dado pela Equação (3.11):

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25) * T_s [s] \quad (3.11)$$

Onde $n_{preamble}$ é o número de símbolos do preâmbulo e T_s a duração de cada símbolo.

$T_{payload}$ corresponde ao tempo que perfaz os campos PHDR, o PHY *Payload* e o CRC, e pode ser calculado a partir da Equação (3.12):

$$T_{payload} = n_{payload} * T_s [s] \quad (3.12)$$

Onde $n_{payload}$ é o número de símbolos necessário para transmitir os campos acima mencionados e é dado pela Equação (3.13):

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left[\frac{(8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right] (CR + 4), 0 \right) \quad (3.13)$$

O valor de PL corresponde ao número de bytes do campo PHY *Payload*, SF corresponde ao fator de espalhamento utilizado, $IH = 1$ é usado quando o modo *Implicit Packet* está ativo e $IH = 0$ quando é utilizado o modo *Explicit Packet*. DE definido a 1 indica a utilização de um parâmetro de otimização para baixo ritmo binário. CRC a 1 indica a presença de um CRC. CR corresponde ao *Code Rate* do *payload* e pode assumir valores de 1 a 4. CR com o valor de 1 corresponde ao *Code Rate* mais baixo de 4/5.

A partir do tempo de transmissão é possível calcular o tempo em que um canal necessita de estar inativo, T_{off} , após o envio de um pacote, de modo a respeitar as restrições de *duty-cycle*:

$$T_{off} = \frac{T_{packet}}{DutyCycle} - T_{packet} [s] \quad (3.14)$$

Este valor pode variar desde alguns milissegundos até vários minutos, dependendo principalmente do tamanho do *payload* e do SF utilizado. Quanto maiores forem estes dois parâmetros, maior será o tempo de transmissão e, conseqüentemente, o tempo de T_{off} .

Como já mencionado nesta secção, o campo PHY *Payload* contém a informação a ser entregue às camadas superiores. A Figura 3.9 representa os diferentes campos presentes em PHY *Payload*.

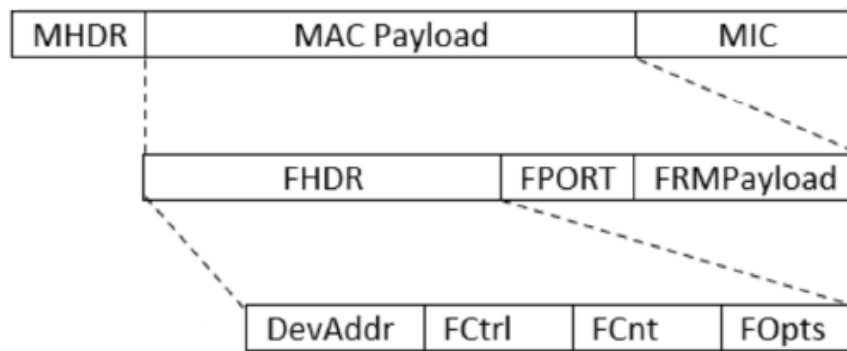


Figura 3.9 - Formato do campo PHY Payload (adaptado de [39]).

O MHDR contém informação sobre a versão do protocolo LoRaWAN a ser utilizado e o tipo de mensagem a ser enviada no *MAC Payload*. Está presente um terceiro campo, reservado para futuras especificações.

O *MAC Payload* é subdividido em 3 campos: FHDR, FPORT e FRM *Payload*.

FPORT é um campo com dimensão de 1 byte que indica o tipo de dados que são enviados no campo FRM *Payload*. FRM *Payload* transporta os dados de aplicação. Caso FPORT apresente o valor 0, comandos MAC podem ser incluídos no *payload*.

Os comandos MAC são mensagens de controlo utilizadas para gerir e ajustar parâmetros da rede entre o dispositivo final e o servidor de rede, sendo fundamentais para a manutenção da qualidade de comunicação e eficiência de uma rede LoRaWAN. Estes comandos são definidos na especificação LoRaWAN e podem ser consultados em [40].

O cabeçalho FHDR contém campos essenciais para a camada MAC, onde se inclui o

DevAddr, FCtrl, FCnt e FOpts.

DevAddr identifica um dispositivo dentro da rede. Este campo já foi referido na secção 3.2 no contexto da ativação de dispositivos finais. FCtrl é um campo que contém *flags* para várias opções de controlo, tais como ACK (*Acknowledgment*), que é ativa aquando do envio de uma resposta a uma mensagem que necessita de confirmação, Fpending que indica se ainda existe dados a ser recebidas após a presente mensagem, entre outras. FCnt regista o número de *frames* enviados pelo dispositivo de modo a detetar duplicados ou *frames* perdidos. Por fim, FOpts é um campo opcional onde é possível enviar comandos MAC adicionais, até um tamanho máximo de 15 bytes. Caso FPORT apresente o valor 0, o que indica que comandos MAC podem estar presentes no FRM *Payload*, FOpts é omitido do corpo da mensagem [39][41].

A dimensão, N , de dados úteis que podem ser enviados no campo FRM *Payload*, em uma única mensagem, pode ser calculada a partir da Equação (3.15):

$$N = M - FHDR_{len} - 1 \text{ [bytes]} \quad (3.15)$$

Onde $FHDR_{len}$ é a dimensão, em bytes, do campo FHDR, que pode variar entre 7 e 22 bytes em função da dimensão do campo FOpts, e M a dimensão máxima do MAC *Payload*. No caso particular da Europa, M está relacionado diretamente com o *Spreading Factor* utilizado, tal como representado na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Valor de M para diferentes SF e largura de banda de 125 kHz (adaptado de [41]).

SF	M [bytes]
12	59
11	59
10	59
9	123
8	250
7	250

Nas condições da tabela acima, ao utilizar um SF de 7 e um $FHDR_{len}$ mínimo de 7 bytes, obtém-se, como dimensão máxima da carga útil presente em uma mensagem LoRa, o valor de 242 bytes.

4. Arquitetura do Sistema

Este capítulo tem como objetivo descrever a estrutura geral do sistema. Topologicamente, o sistema é baseado na arquitetura tradicionalmente utilizada por uma rede LoRa/LoraWAN, pelo que é composta por nós com capacidade para detetar, processar e transmitir dados relevantes para a deteção sísmica, uma *gateway*, responsável pela gestão da rede e encaminhamento desses dados, e um servidor onde a informação será armazenada e disponível em tempo real para efeitos de monitorização e análise.

4.1. Diagrama de Blocos

Na Figura 4.1 está presente o diagrama de blocos da arquitetura a implementar.

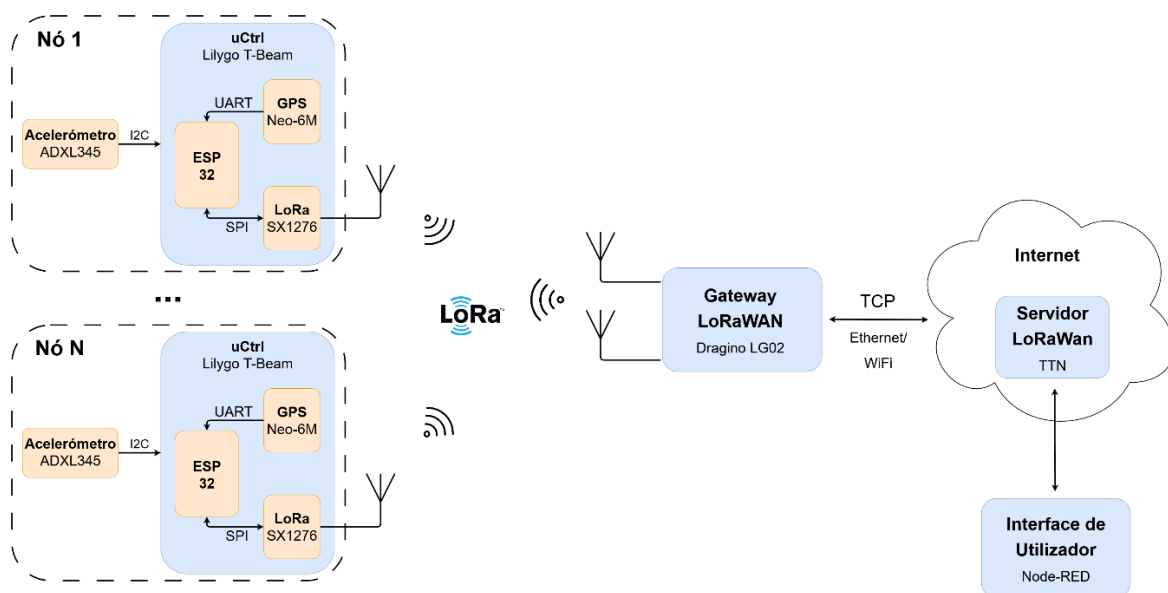


Figura 4.1 - Arquitetura geral do sistema.

Observando a arquitetura acima, a rede segue uma topologia em estrela suportada pelo protocolo LoRaWAN. Este protocolo opera na camada MAC, sendo responsável por gerir a comunicação entre os diferentes nós e a *gateway*. A sua operação é sustentada na camada física pela modulação LoRa. Esta implementação permite ao sistema obter uma boa eficiência energética ao nível dos nós finais, simultaneamente proporcionando distâncias de propagação elevadas. Além do já mencionado, o protocolo LoRaWAN suporta segurança *end-to-end* e permite a inclusão de novos nós sem necessidade de uma reconfiguração completa da rede, tornando-o em um protocolo flexível no que à expansão da rede diz respeito.

4.2. Elementos do Nó Final

A placa de desenvolvimento escolhida para a implementação do nó final foi o *Lilygo T-Beam* [42] presente na Figura 4.2. Este modelo, baseado no microcontrolador ESP32, tem como principal característica a integração de múltiplas tecnologias em um único dispositivo. Além do módulo LoRa SX1276 capaz de operar na gama de frequências ISM autorizada pela União Europeia (EU863-870), este dispositivo possui um módulo GPS e um suporte para baterias do tipo 18650.

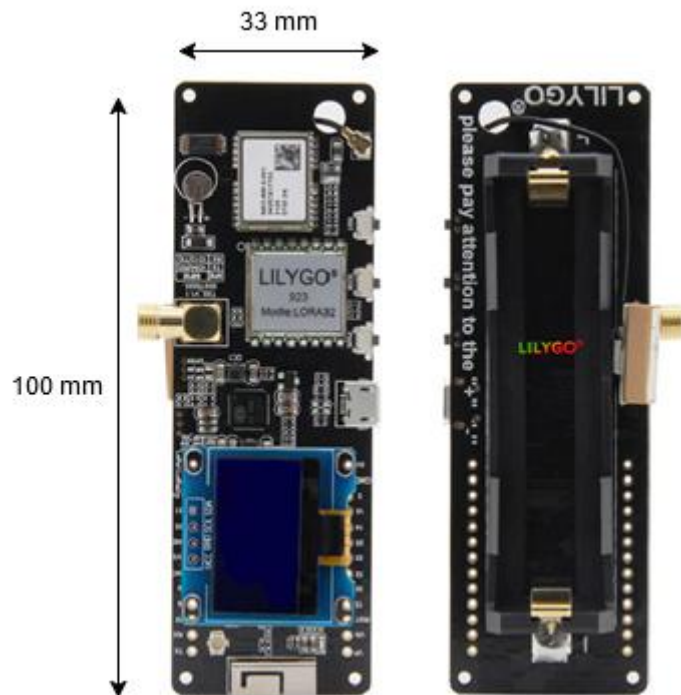


Figura 4.2 - Placa de desenvolvimento Lilygo T-Beam (adaptado de [42]).

Ao ter as funcionalidades mencionadas já integradas no modelo, elimina-se a necessidade de adicionar e interligar vários módulos externos. Isto reduz a complexidade dos circuitos, resultando em um dispositivo mais compacto e organizado. Outra vantagem é o aumento da robustez da solução final, uma vez que se diminui a probabilidade de falhas resultantes de mau contacto ou desgaste em ligações entre módulos externos. Em contrapartida, esta solução oferece pouca flexibilidade para otimização ou substituição de componentes danificados. No entanto, tendo em conta o custo de aquisição acessível, e a facilidade com que o protocolo LoRaWAN permite adicionar novos dispositivos à rede, a substituição completa de um nó não deixa de ser uma solução viável.

Em termos de especificações técnicas, o ESP32 integrado no *Lilygo T-Beam* conta com um processador *dual-core* de 32 bits a 240 MHz, 448 kB de *Read-Only Memory* (ROM), 520 kB

de *Static Random Access Memory* (SRAM) e módulos Wi-Fi de 2,4 GHz e *Bluetooth* v4.2 [35]. Para ampliar a capacidade de memória do microcontrolador, foram adicionados 4 MB de memória flash e 8 MB de *Pseudo Static Random Access Memory* (PSRAM) através de chips externos [34]. Relativamente ao consumo de energia, o ESP32 dispõe de cinco modos de operação distintos, conforme ilustrado Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Modos de operação do ESP32 (adaptado de [43]).

Modo de operação	Consumo nominal
Active	95 – 240 mA
Modem-sleep	20 – 68 mA
Light-sleep	0,8 mA
Deep-sleep	10 – 150 μ A
Hibernation	5 μ A

Conforme referido anteriormente, o *Lilygo T-Beam* também integra os módulos LoRa SX1276 e GPS Neo-6M, cujas principais características podem ser consultadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características do módulo LoRa SX1276 e GPS Neo-6M (adaptado de [44] e [45]).

Módulo LoRa SX1276		Módulo GPS Neo-6M	
Consumo em TX max [mA]	120	Consumo max [mA]	67
Consumo em RX max [mA]	12	Sensibilidade [dBm]	-161
Potência de TX max [dBm]	20	Taxa de atualização [Hz]	5
Sensibilidade [dBm]	-148	Precisão [m]	2.5
Banda de frequência [MHz]	862 - 1020	Nº Canais	50

É importante notar que o módulo GPS também dispõe de um modo de operação de baixo consumo, que reduz a taxa de atualização para 1 Hz e o consumo energético para cerca de 11 mA.

O único componente do nó que não estará integrado na placa de desenvolvimento é o sensor acelerómetro. Um dos propósitos deste projeto é analisar a viabilidade de utilizar

acelerómetros comerciais e de baixo custo na deteção de atividade sísmica, tornando a sua seleção importante. Para a presente aplicação, atributos como consumo energético, largura de banda e resolução são fundamentais, dado que o acelerómetro deve ser capaz de identificar, com uma boa precisão, as oscilações de baixa frequência causadas por um sismo, enquanto minimiza o impacto na durabilidade da bateria do nó. Tendo em conta estes atributos, a escolha recaiu sobre o acelerómetro *ADXL345* [46], cujo as características principais estão descritas na Figura 4.3 e Tabela 4.3.

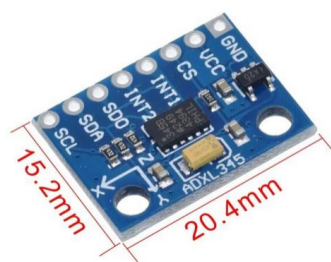


Figura 4.3 - Acelerómetro *ADXL345* (retirado de [47]).

Tabela 4.3 - Principais características *ADXL345* (adaptado de [46])

Tecnologia	MEMS
Consumo energético [μA]	23 - 140
Largura de banda [Hz]	0,1 – 3200
Resolução [mg/LSB]	3,9 (13-bit)
Nº de eixos	3 eixos (x,y,z)
Gama dinâmica	$\pm 2\text{g}/\pm 4\text{g}/\pm 8\text{g}/\pm 16\text{g}$

Entre os sensores avaliados, o *ADXL345* destacou-se por apresentar o menor consumo energético, aliado a uma largura de banda mais adequada. Em contrapartida, outros acelerómetros, como o *MPU-6050* [48], oferecem uma resolução superior (16 bit), mas apresentam um consumo significativamente mais elevado (500 μA) e não são sensíveis a frequências inferiores a 4 Hz. Embora o *ADXL345* apresente a largura de banda mais adequada entre os sensores avaliados, poderá enfrentar limitações na medição de sismos cujas vibrações ocorram em frequências inferiores a 0,1 Hz (ver Tabela 2.1). Nesses casos, dispositivos mais especializados, como sismómetros, seriam mais adequados para a medição de vibrações em frequências tão baixas. No entanto, a utilização desses instrumentos

ultrapassa o âmbito definido para o projeto.

Para assegurar uma estrutura estável, capaz atenuar parcialmente as vibrações indesejadas, todos os componentes do nó foram fixados na plataforma da Figura 4.4.

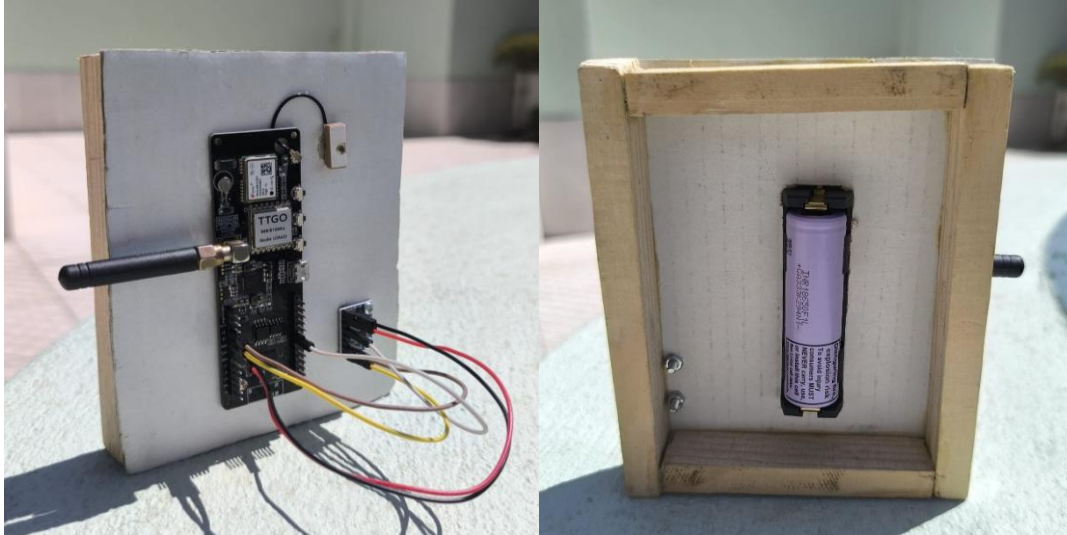


Figura 4.4 – Protótipo do nó final.

4.3. Gateway

Com os componentes do nó final definido, o foco passou para a seleção da *gateway* responsável por receber os dados provenientes do nó e reencaminhá-los para o servidor LoRaWAN. Para este propósito, foi escolhido o modelo *LG02* da *Dragino* [49], ilustrado na Figura 4.5. Este modelo é uma *gateway* de dois canais e possibilita a interligação de uma rede LoRa a uma rede IP, através de uma conexão Wi-Fi ou *Ethernet*. Utiliza os mesmos transceptores LoRa *SX1276* presentes no nó final e oferece uma interface de utilizador que permite a configuração manual de diversas características de uma ligação LoRa, como o SF, CR, largura de banda e canais utilizados. Esta funcionalidade possibilita a realização de testes mais detalhados sobre a qualidade da rede.

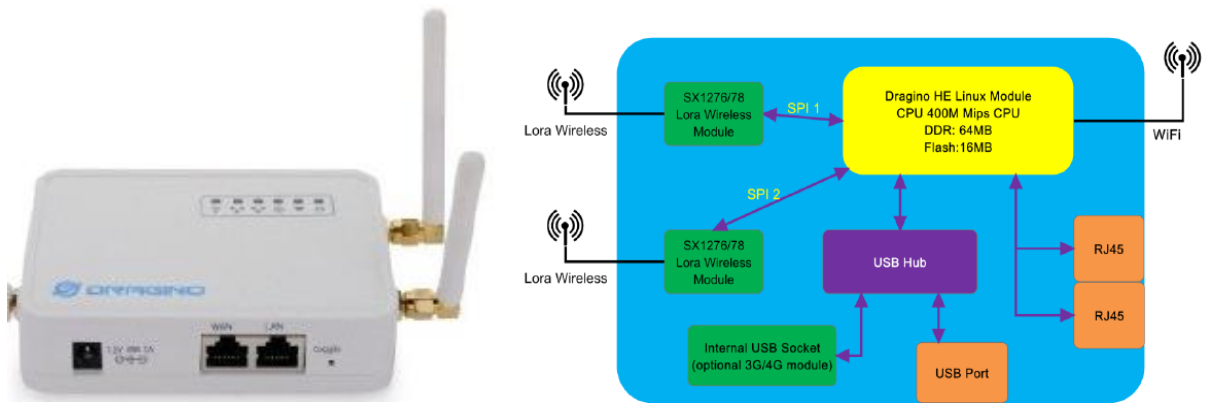


Figura 4.5 - Dragino LG02 (retirado de [49]).

No entanto, esta *gateway* apresenta algumas limitações quando utilizada em redes LoRaWAN. De acordo com a especificação do protocolo, os nós transmitem dados através de *frequency hopping*, isto é, alternam entre diferentes canais de rádio e podem aplicar parâmetros de transmissão distintos a cada mensagem enviada. Contudo, a *LG02* apenas suporta uma frequência fixa de operação, o que significa que a *gateway* apenas consegue receber corretamente os pacotes transmitidos no canal correspondente à frequência previamente configurada. Para garantir que todos os pacotes enviados são recebidos pela *LG02* e transmitidos para o servidor LoRaWAN, é necessário configurar o nó final de modo a utilizar sempre a frequência definida na *gateway*.

4.4. Servidor LoRaWAN

Por fim, é necessário estabelecer a ligação a um servidor LoRaWAN. Para tal, foi selecionado o servidor gratuito disponibilizado pela *The Things Network* (TTN) [50]. Este servidor é amplamente utilizado na implementação de redes LoRaWAN, devido à sua facilidade na configuração de novos dispositivos e *gateways*. O TTN possibilita a visualização de dados em tempo real através da sua consola, além de fornecer métricas relativas à qualidade da rede. Embora não possua um painel gráfico integrado para análise e visualização dos dados, é possível utilizar integrações com plataformas como o *Node-RED* [51] para esse efeito. Contudo, o TTN segue uma política de uso justo, que limita o tempo de transmissão dos dispositivos a 30 s por dia e impõe restrições na frequência das mensagens.

4.5. Integração da plataforma *Node-RED*

O *Node-RED* é uma plataforma de programação baseada em fluxos (*flows*). Através de uma interface gráfica com nós que se ligam entre si, permite processar e encaminhar dados de várias fontes, como sensores, dispositivos IoT e serviços *web*. A sua interface visual facilita o desenvolvimento rápido de protótipos e a criação de soluções de monitorização e controlo em tempo real. Suporta vários protocolos de comunicação, incluindo o *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), que será utilizado para integrar o *Node-RED* com o servidor da TTN.

O MQTT [52] é um protocolo de comunicação amplamente utilizado em aplicações de IoT e em comunicações M2M para a troca de mensagens entre dispositivos. Desenvolvido para operar em ambientes com recursos limitados e em redes de largura de banda reduzida, o MQTT segue um modelo de publicação e subscrição, no qual os dispositivos (clientes) publicam mensagens em tópicos específicos, enquanto outros dispositivos subscrevem esses tópicos para receber as mensagens correspondentes. A gestão da comunicação é assegurada por um *broker*, que atua como servidor central, recebendo as mensagens dos clientes e encaminhando-as para os subscritores apropriados [53]. A TTN possui um broker integrado no seu servidor LoRaWAN, o que facilita a implementação do protocolo MQTT. Um exemplo da sua utilização está apresentado na Figura 4.6

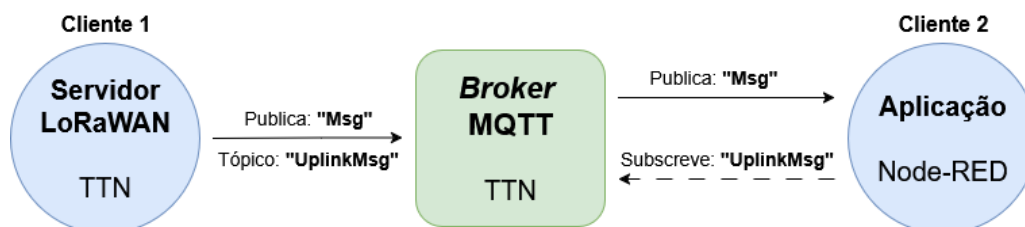


Figura 4.6 - Exemplo de uso do protocolo MQTT.

O MQTT também permite definir diferentes níveis de QoS, que determinam a fiabilidade na entrega das mensagens:

- **QoS 0 – “at most once”**: a mensagem é enviada uma única vez, sem confirmação de receção.
- **QoS 1 – “at least once”**: a mensagem é enviada até ser confirmada pelo destinatário, podendo ser recebida mais que uma vez.
- **QoS 2 – “exactly once”**: garante que a mensagem é recebida apenas uma vez, através de um processo de *handshake* mais complexo.

A escolha de um nível de QoS permite selecionar o nível de serviço que melhor se ajusta à capacidade da rede e às características inerentes a cada aplicação.

5. Implementação do Sistema

Este capítulo contém uma descrição detalhada da implementação do sistema apresentado no capítulo anterior. A descrição encontra-se organizada em várias seções, e aborda temas como o desenvolvimento do *firmware* do nó final, a configuração da *gateway* e do servidor LoRaWAN, e a criação de um *dashboard* para a visualização dos dados.

5.1. Firmware do Nó Final

O *firmware* desenvolvido controla o funcionamento do sistema de deteção sísmica e assegura a operação dos diferentes módulos de *hardware* e bibliotecas utilizadas. Este é responsável pela inicialização e configuração de todos os componentes, aquisição e processamento de dados do acelerómetro e do módulo GPS, envio desses dados via LoRaWAN e execução do modelo de *Machine Learning* responsável pela deteção de eventos sísmicos. Todo o desenvolvimento foi realizado com recurso à linguagem de programação C++.

As principais rotinas implementadas e a forma como estas se interligam são ilustradas no diagrama de blocos da Figura 5.1.

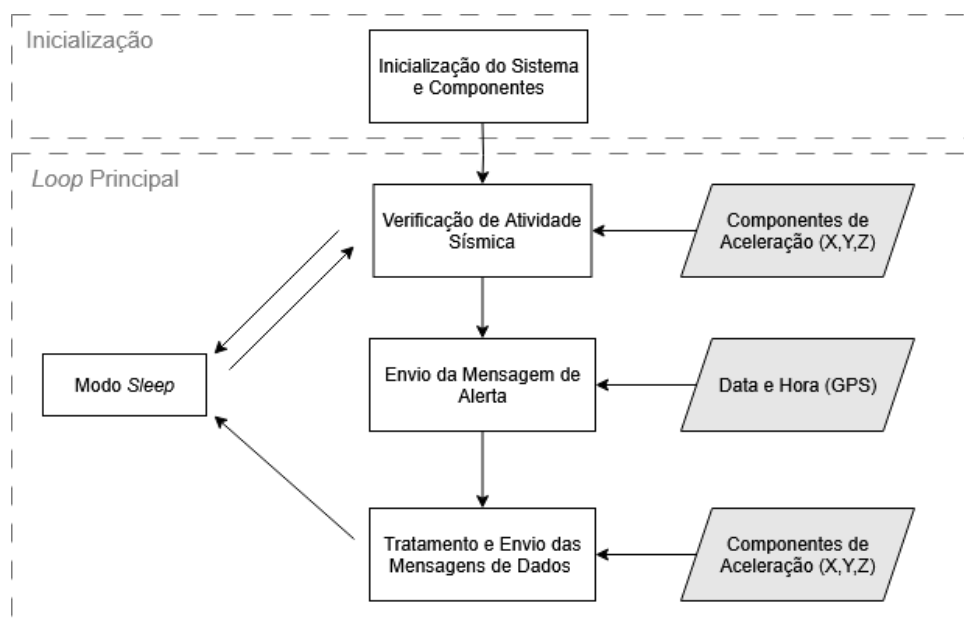


Figura 5.1 - Diagrama de blocos do firmware implementado.

Inicialização do Sistema e Componentes

Esta rotina assegura que todos os módulos essenciais ao funcionamento do sistema estão corretamente configurados e prontos a operar. Entre estes módulos, destaca-se o acelerómetro *ADXL345*, configurado com uma gama dinâmica de ± 2 g, valor suficiente para a deteção das vibrações características de atividade sísmica. Segundo o *datasheet*, esta escolha proporciona uma resolução de 3,9 mg/LSB, valor significativamente superior ao de outras gamas dinâmicas, como ± 16 g, que apresenta uma resolução de 31,2 mg/LSB. São ainda aplicados valores de calibração (*offset*) a cada eixo, de modo a corrigir desvios nas medições de aceleração e aumentar a fiabilidade dos dados obtidos. Adicionalmente, a frequência de amostragem do sensor foi configurada para 100 Hz, o que se traduz em uma largura de banda de cerca de 50 Hz. Esta escolha abrange a gama de frequências relevante para eventos sísmicos, evitando a necessidade de frequências de amostragem excessivamente elevadas que implicariam maior processamento, consumo energético e volume de dados a transmitir.

O módulo LoRa, gerido com recurso à biblioteca MCCI LMIC [54], é configurado para operação na banda EU863–870, mais concretamente na sub-banda M, sendo possível ajustar parâmetros de transmissão como canal utilizado, fator de espalhamento e potência de transmissão. Já parâmetros como o *code rate* e a largura de banda não podem ser alterados diretamente, permanecendo fixos a 4/5 e 125 kHz, respetivamente. A rede LoRaWAN é estabelecida através do método de ativação ABP, com recurso às chaves de sessão *NwkSkey* e *AppSkey*, bem como o endereço do dispositivo *DevAddr*, atribuídos aquando da configuração do servidor. O método ABP foi selecionado por ser mais adequado a cenários com nós de localização fixa, eliminando a complexidade associada ao processo de autenticação dinâmica do OTAA.

Para a deteção de atividade sísmica, o sistema integra o modelo de ML descrito em [5], desenvolvido em paralelo com esta dissertação. Durante a fase de inicialização, o modelo é carregado e preparado para execução através da biblioteca *TensorFlow Lite for Microcontrollers* [55].

Durante esta rotina, outros módulos, como o GPS *Neo-6M*, também são configurados. Este está definido para operar em modo *Power Save*, reduzindo o consumo de 39 mA para 11 mA. Esta redução implica uma perda de desempenho que pode ser desprezada, dado que o GPS se limita a fornecer informação de data e hora de forma esporádica.

Verificação de Atividade Sísmica

Esta rotina constitui o coração do sistema, sendo responsável pela deteção de eventos sísmicos em tempo real através da execução do modelo de ML. Na ausência de atividade

sísmica, a rotina é executada com uma periodicidade de 1 s. Este intervalo pode ser ajustado em função dos requisitos necessários: uma frequência de execução mais elevada proporciona uma resposta mais instantânea a eventos, enquanto uma frequência mais reduzida contribui para a diminuição do consumo energético.

Em cada ciclo de execução procede-se à aquisição de um conjunto de amostras provenientes do acelerómetro, recolhidas à frequência de amostragem de 100 Hz estabelecida aquando da fase de configuração do sistema. Sobre este conjunto de dados é calculado o valor médio das 3 componentes de aceleração, seguido da aplicação de uma *Fast Fourier Transform* (FFT), da qual se extrai a frequência dominante de cada componente (X,Y,Z). Os dados são então organizados e disponibilizados como vetor de entrada ao modelo de ML, que, após o processo de inferência, devolve uma probabilidade entre 0 e 1, que expressa o nível de confiança associado à ocorrência de um evento sísmico. Sempre que a probabilidade obtida excede o limiar de 0,8, a rotina devolve o valor lógico *true*, indicando a ocorrência de atividade sísmica.

O comportamento descrito pode ser visualizado no fluxograma da Figura 5.2.

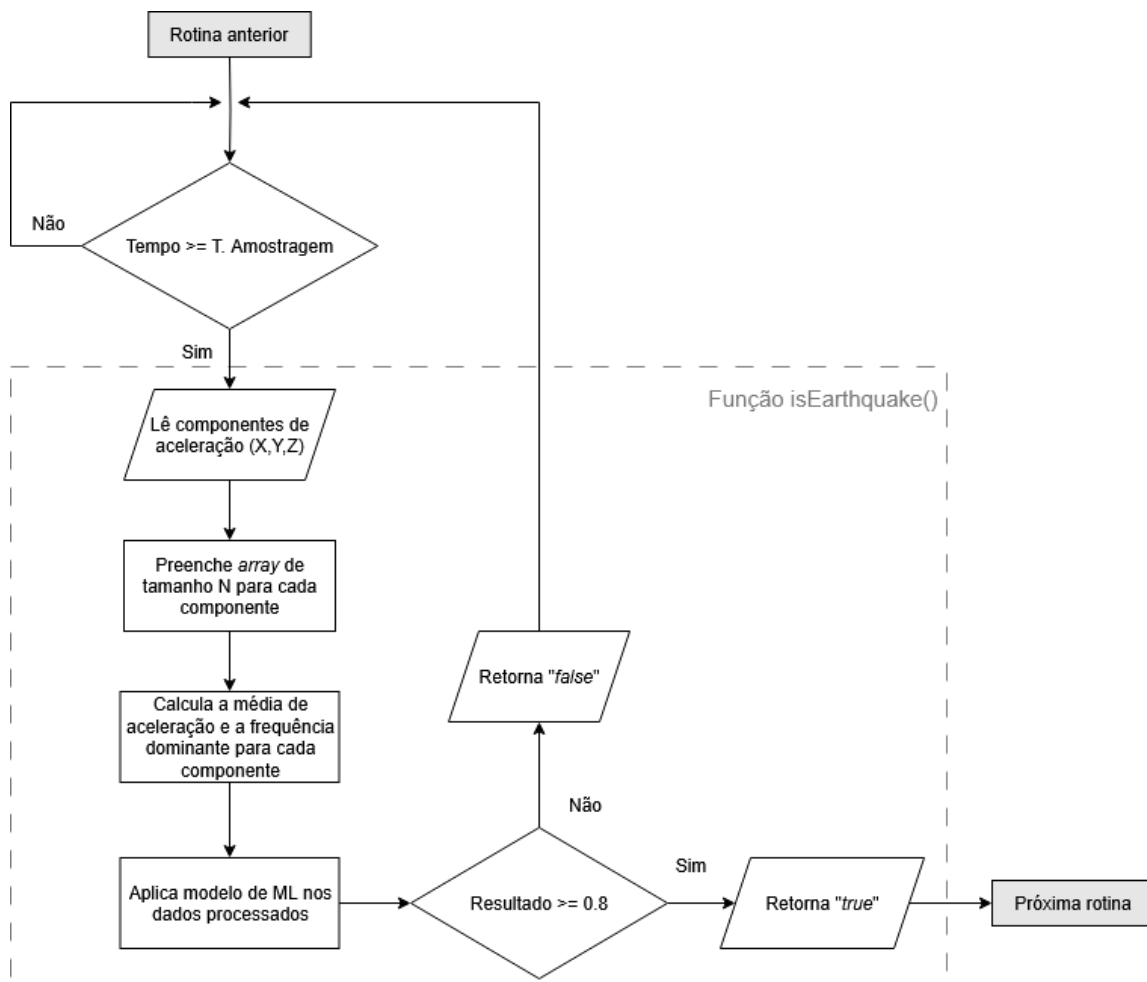


Figura 5.2 - Fluxograma da rotina de verificação de atividade sísmica.

Os dados de entrada do modelo de ML foram definidos com base na análise do *dataset* ilustrado na Figura 5.3 (a), construído a partir de registos de aceleração correspondentes a um sismo real, disponíveis em [56], aos quais foi adicionado ruído urbano obtido através de medições realizadas com o acelerómetro *ADXL345* durante a passagem de um automóvel. A análise do *dataset* revelou que o ruído urbano adicionado entre o segundo 90 e 105, pode atingir valores de aceleração semelhantes em magnitude aos de um evento sísmico, o que pode potencialmente conduzir a falsos positivos. Para compreender melhor como mitigar estes efeitos, foi realizada uma análise do *dataset* no domínio da frequência, cujos resultados se encontram representados sob a forma dos espetrogramas presentes na Figura 5.3 (b).

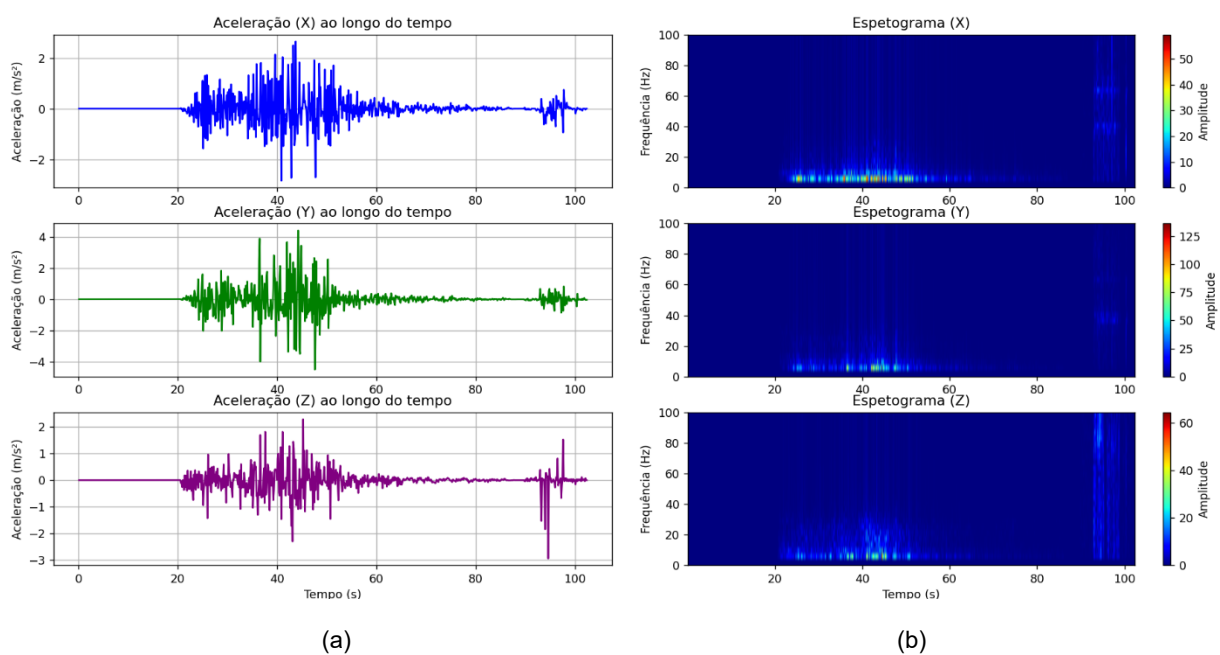
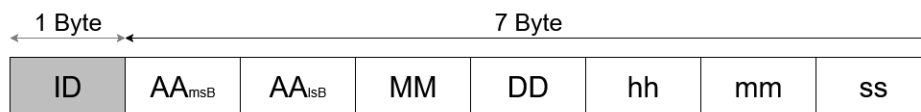


Figura 5.3 - (a) Dataset (b) Espectrograma.

Os espetrogramas mostram que a secção correspondente à atividade sísmica apresenta uma gama de frequências mais reduzida, concentrando-se principalmente abaixo de 20 Hz, em contraste com a secção de ruído, que exibe uma distribuição de frequências mais dispersa. Esta diferença na distribuição de frequências, em conjugação com os dados de aceleração, permite ao modelo de ML distinguir de forma mais consistente entre atividade sísmica verdadeira e ruído, pelo que a frequência dominante (frequência de maior magnitude) de cada conjunto de dados de aceleração é incorporada como um dos parâmetros de entrada do modelo. Informações adicionais sobre o desenvolvimento e o treino do modelo encontram-se disponíveis em [5].

Envio da Mensagem de Alerta

A mensagem de alerta corresponde a um de dois tipos de mensagens implementados no sistema. Esta mensagem, cujo formato está presente na Figura 5.4, tem como finalidade alertar o utilizador que o sistema detetou um conjunto de vibrações consideradas indicativas do início de um evento sísmico. Devido ao seu carácter urgente, é uma mensagem que requer pouco processamento para ser enviada, sendo composta apenas por 1 byte que a identifica como mensagem de alerta e 7 bytes com a data e hora do início da ocorrência, obtidas a partir do módulo GPS integrado.



ID: Identificador da mensagem; AA_{msB}: Ano Byte de maior peso; AA_{lsB}: Ano Byte de menor peso; MM: Mês; DD: Dia; hh: Hora; mm: Minuto; ss: segundo;

Figura 5.4 - Formato da mensagem de alerta.

A rotina de envio de mensagens de alerta, representada na Figura 5.5, inicia-se com a verificação da *flag canSend*, responsável por regular o envio de todas as mensagens LoRaWAN. Quando esta se encontra ativa, o sistema procede à construção da mensagem, no formato indicado na Figura 5.4. A transmissão é então solicitada à biblioteca MCCI LMIC, que controla todo o processo de envio de forma não-bloqueante e assegura o cumprimento das regras de *duty-cycle*. Durante este processo, a *flag canSend* é desativada, de modo a impedir que sejam iniciadas novas transmissões em simultâneo. Após a conclusão do envio, a própria biblioteca aciona o evento EV_TXCOMPLETE, que reativa a *flag canSend* e devolve ao sistema a capacidade de efetuar futuras transmissões.

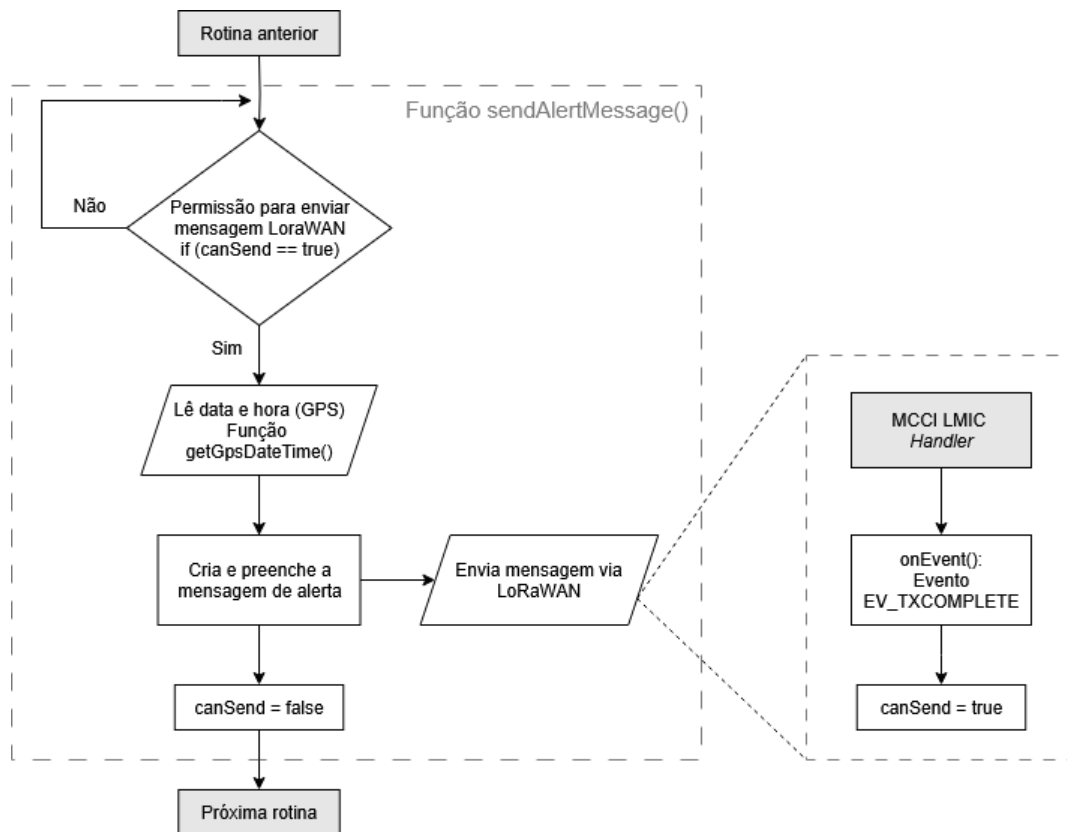


Figura 5.5 - Fluxograma da rotina de envio da mensagem de alerta.

Tratamento e Envio das Mensagens de Dados

A mensagem de dados corresponde ao segundo tipo de mensagem e é responsável por transportar os dados de aceleração recolhidos durante um evento sísmico.

Cada amostra recolhida pelo acelerómetro é composta por três componentes de aceleração correspondentes aos eixos X, Y e Z, cada uma ocupando 4 bytes, o que totaliza 12 bytes por amostra. Considerando que a biblioteca MCCI LMIC impõe um limite máximo de *payload* útil de 51 bytes por mensagem, o valor efetivamente utilizado é ajustado para 48 bytes, de forma a garantir que apenas conjuntos completos de amostras são incluídos em cada mensagem. Deste modo, cada transmissão pode transportar no máximo quatro amostras completas ($4 \times 12 \text{ bytes} = 48 \text{ bytes}$), no formato presente na Figura 5.6. Este procedimento evita que uma amostra seja dividida entre mensagens diferentes e assegura a integridade da informação durante o processo de transmissão e receção.

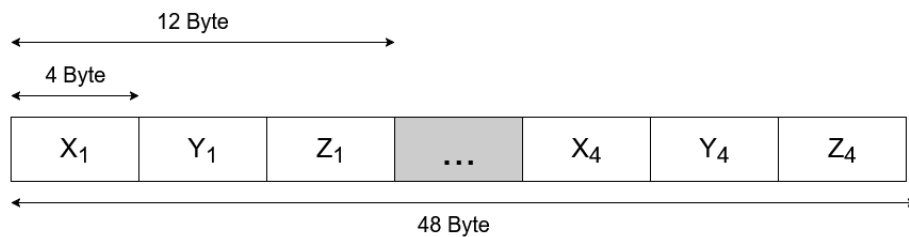


Figura 5.6 - Formato da mensagem de dados.

A rotina de tratamento e envio das mensagens de dados é iniciada após o envio da mensagem de alerta e segue o fluxograma da Figura 5.7. Durante um período de aquisição, os dados do acelerómetro são recolhidos à frequência de amostragem de 100 Hz e armazenados num *array* de dimensão variável. A dimensão do *array* é ajustada indiretamente consoante o período definido para aquisição de dados, de modo a abranger toda a duração prevista do evento sísmico. As amostras recolhidas são segmentadas em pacotes de acordo com o formato previamente definido e transmitidas de forma sequencial, recorrendo à *flag canSend* de modo idêntico à rotina de envio de alertas, assegurando que cada transmissão cumpre as restrições de *duty-cycle* impostas pela rede LoRaWAN. Após a conclusão do envio, encerra-se o conjunto de rotinas principais e o sistema entra em suspensão (modo *sleep*).

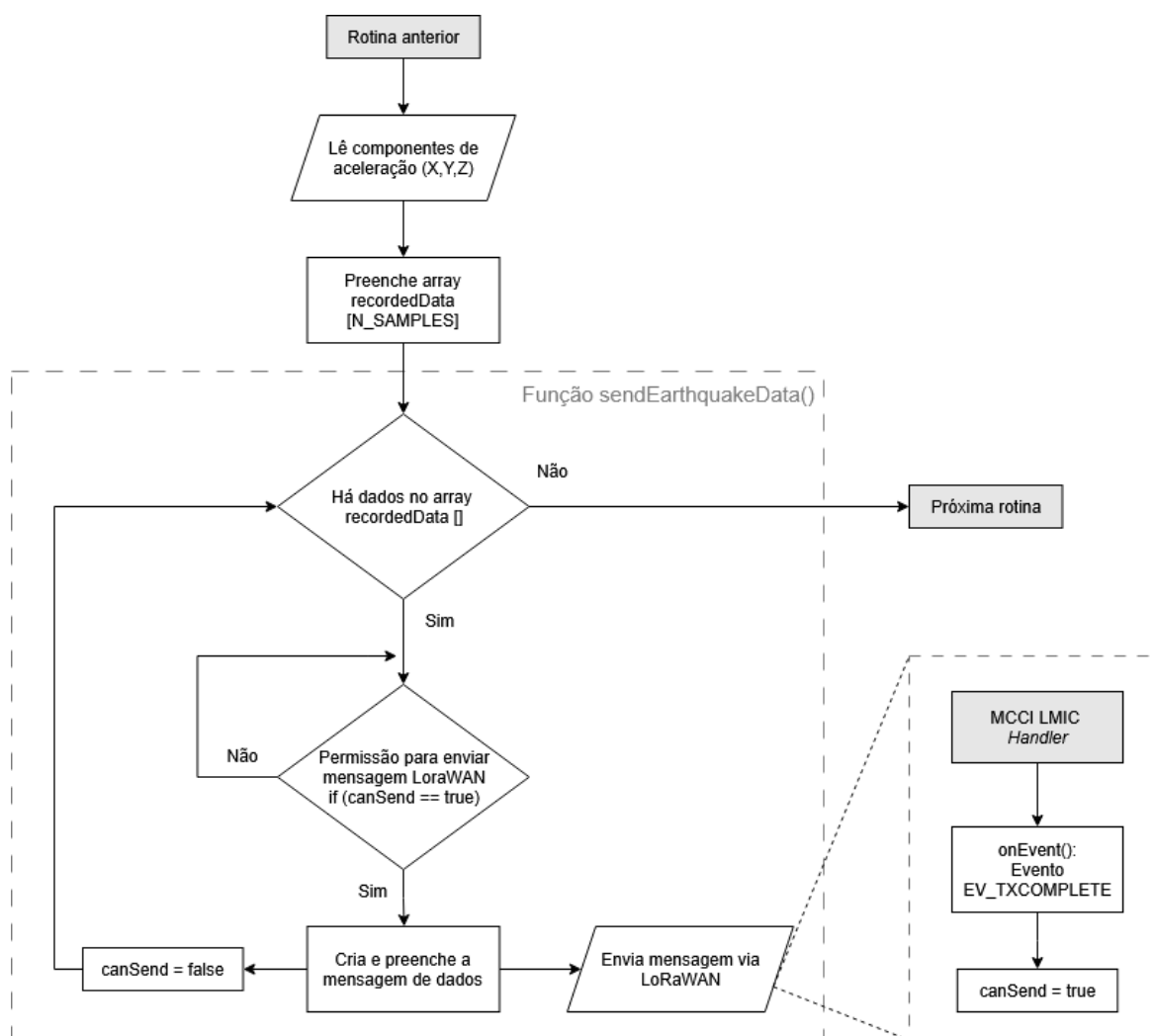


Figura 5.7 - Fluxograma da rotina de tratamento e envio das mensagens de dados.

Modo Sleep

Esta rotina é responsável por colocar o microcontrolador no modo de operação *Deep-Sleep*. Neste estado, o ESP32 desativa a maioria das suas funcionalidades, mantendo apenas a alimentação dos periféricos GPS e acelerómetro, o que resulta em uma redução significativa do consumo energético. Imediatamente antes de entrar neste estado, é também ativado o modo de baixo consumo do acelerómetro e a sua frequência de amostragem reduzida para 12,5 Hz. O sistema entra em modo *Deep-Sleep* em duas situações específicas: durante a rotina de verificação de atividade sísmica, caso não seja detetado nenhum evento por mais de 30 s, ou imediatamente após a conclusão do envio de dados relativos a um evento detetado.

Para sair deste estado, recorreu-se a uma funcionalidade do *ADXL345* que permite configurar um dos seus pinos de modo que este apresente o nível lógico “1” sempre que a aceleração ultrapasse um *threshold* ajustável. O microcontrolador utiliza esta funcionalidade para sair do

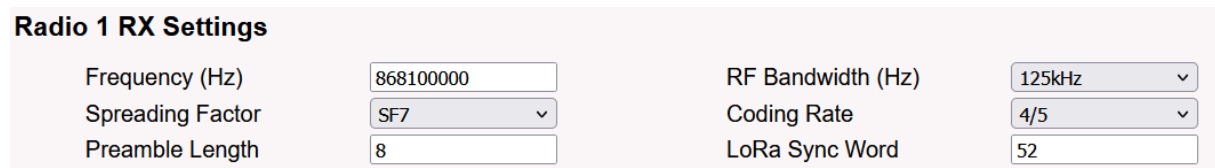
modo *Deep-Sleep*, retomando a execução do programa quando é indicado que a aceleração ultrapassou o *threshold* definido. Este *threshold* foi configurado para ser relativamente sensível, de forma que a decisão final sobre a ocorrência de um sismo fique a cargo do algoritmo de ML.

5.2. Configuração da Gateway

Para que a *gateway* assegure o reencaminhamento das mensagens recebidas para o servidor, é necessário configurá-la de forma adequada, através da definição dos parâmetros da comunicação rádio e do servidor LoRaWAN.

De modo a aceder à interface de configuração da *gateway*, estabelece-se a ligação à rede Wi-Fi criada pelo dispositivo e acede-se à interface através de um navegador, utilizando o endereço IP predefinido, 10.130.1.1.

Após este passo, torna-se possível configurar os parâmetros da ligação física LoRa, nomeadamente a frequência do canal, largura de banda, fator de espalhamento e *Coding Rate*, conforme ilustrado na Figura 5.8.

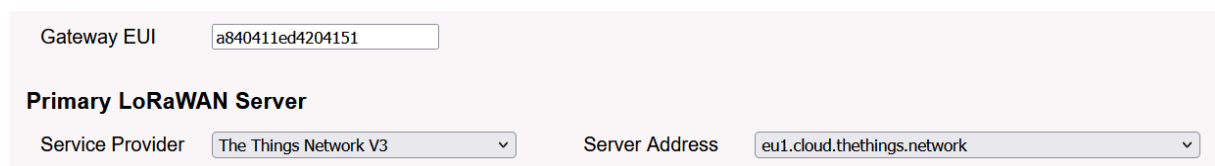


The screenshot shows the 'Radio 1 RX Settings' interface with the following configurations:

Parameter	Value	Parameter	Value
Frequency (Hz)	868100000	RF Bandwidth (Hz)	125kHz
Spreading Factor	SF7	Coding Rate	4/5
Preamble Length	8	LoRa Sync Word	52

Figura 5.8 - Configuração da ligação física LoRa.

Ainda nesta interface, é também configurado o servidor LoRaWAN com o qual a *gateway* tem de comunicar, assim como o *Extended Unique Identifier* (EUI) da *gateway* (Figura 5.9).



The screenshot shows the 'Gateway EUI' and 'Primary LoRaWAN Server' configuration interface with the following configurations:

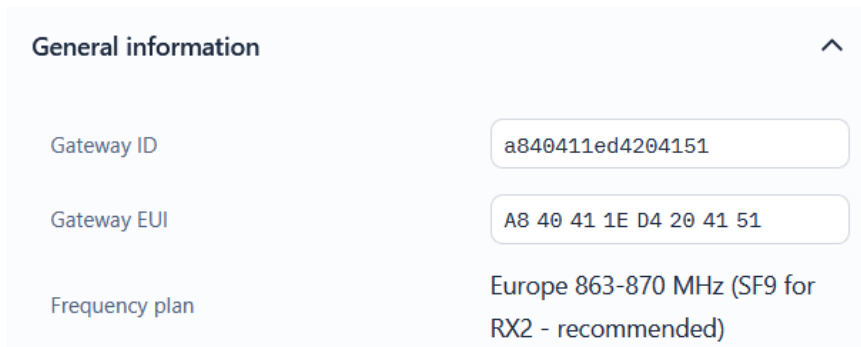
Field	Value
Gateway EUI	a840411ed4204151
Primary LoRaWAN Server	
Service Provider	The Things Network V3
Server Address	eu1.cloud.thethings.network

Figura 5.9 - Configuração da ligação ao servidor LoRaWAN.

Por fim, é necessário estabelecer ligação à *Internet* através de uma rede Wi-Fi ou *Ethernet*.

5.3. Configuração do Servidor LoRaWAN

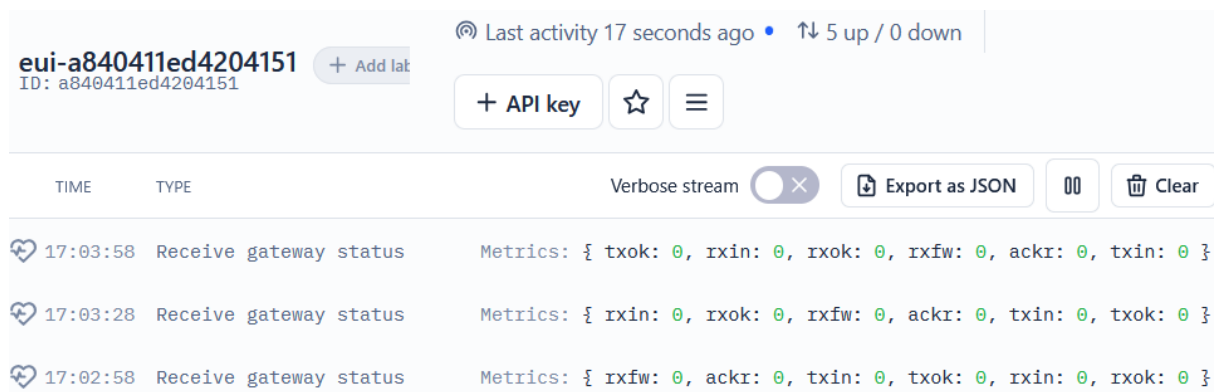
Como mencionado na secção 4.4, é utilizado o servidor LoRaWAN disponibilizado pela TTN. A configuração do servidor inicia-se com o registo da *gateway* previamente configurada. Este processo é relativamente simples, sendo apenas necessário inserir o EUI da *gateway* e o plano de frequências em que se vai transmitir, como exemplificado na Figura 5.10.



General information	
Gateway ID	a840411ed4204151
Gateway EUI	A8 40 41 1E D4 20 41 51
Frequency plan	Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommended)

Figura 5.10 - Registo da gateway no servidor LoRaWAN da TTN.

Após alguns segundos para o estabelecimento da comunicação, a *gateway* torna-se visível no servidor, que passa a receber, a cada 30 s, as mensagens de estado apresentadas na Figura 5.11.



eui-a840411ed4204151 + Add lat
ID: a840411ed4204151

Last activity 17 seconds ago • 5 up / 0 down

+ API key ☆ ☰

Verbose stream Export as JSON

TIME	TYPE	Verbose stream
17:03:58	Receive gateway status	Metrics: { txok: 0, rxin: 0, rxok: 0, rxfw: 0, ackr: 0, txin: 0 }
17:03:28	Receive gateway status	Metrics: { rxin: 0, rxok: 0, rxfw: 0, ackr: 0, txin: 0, txok: 0 }
17:02:58	Receive gateway status	Metrics: { rxfw: 0, ackr: 0, txin: 0, txok: 0, rxin: 0, rxok: 0 }

Figura 5.11 - Mensagens de estado da gateway.

Com a *gateway* registada, resta proceder de igual forma para o nó final. Para tal é necessário criar o que a TTN designa por aplicação, dentro da qual é realizado o registo dos nós que serão incluídos na rede. Para este registo, demonstrado na Figura 5.12, é necessário inserir novamente o plano de frequências, ao qual se adiciona a especificação LoRaWAN utilizada.

No contexto deste sistema, adotou-se a versão 1.0.3, que corresponde à especificação suportada pela biblioteca MCCI LMIC. Além dos parâmetros mencionados, é necessário selecionar o método de ativação, que neste caso corresponde ao método ABP. A seleção deste gera automaticamente as chaves de sessão NwkSKey e AppSKey, bem como o identificador DevAddr, utilizados pelo nó final para se identificar e aderir à rede.

General information	
End device ID	abp-node
Frequency plan	Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2 - recommended)
LoRaWAN version	LoRaWAN Specification 1.0.3
Regional Parameters version	RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A

Session information	
Device address	26 0B A4 7F
NwkSKey
AppSKey

Figura 5.12 - Registo do nó final no servidor LoRaWAN da TTN.

Após este processo, e com a introdução das chaves de sessão e do identificador no *firmware* do nó, este encontra-se preparado para estabelecer comunicação com o servidor LoRaWAN, como demonstrado na Figura 5.13.

LoRa TTGO Test Last activity 21 seconds ago • 2 End devices

↑ 18:46:49	abp-node	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0B A4 7F 7F 0E 05 C0 DC 7A AE C0 D9 A7 3F BF 12 AC 20 BD DD 0C FB BF B4 09 92 BF B2 A6 1B
↑ 18:46:37	abp-node	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0B A4 7F 73 B1 25 C0 A6 49 BC C0 32 B9 F2 BE 56 CC 3E BF 02 24 19 C0 19 72 0D BF 73 B1 25
↑ 18:46:32	abp-node	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0B A4 7F FF 07 E9 08 19 11 2E 13 FPort: 1 Data rate: SF7BW125 SNR: 9 RSSI: -30

Figura 5.13 - Mensagens em uplink provenientes do nó final.

No conjunto de mensagens apresentado é possível distinguir claramente os dois tipos mencionados na secção 5.1: a mensagem de alerta, destacada a verde, com um *payload* de

8 bytes, e as restantes, destacadas a vermelho, correspondentes a mensagens de dados. Adicionalmente, à direita da mensagem de alerta, são visíveis parâmetros da comunicação LoRa, como o SF e largura de banda, bem como métricas de qualidade do sinal rádio.

5.4. Interface de Utilizador

Com as mensagens a serem recebidas no servidor LoRaWAN, resta apresentar os dados na interface de utilizador desenvolvida em *Node-RED*. Este passo inicia-se pela configuração da ligação MQTT. Como mencionado na secção 4.5, o servidor da TTN possui um *broker* MQTT configurado na porta 1883, onde todas as mensagens recebidas são publicadas. Para aceder ao *broker* a partir do *Node-RED*, é necessário configurar um nó MQTT com o *broker* e a respetiva porta, bem como subscrever o tópico correspondente às mensagens *uplink* provenientes do nó final, conforme apresentado na Figura 5.14. Foi também escolhido o nível de QoS 1 de modo a garantir alguma fiabilidade nas mensagens recebidas.

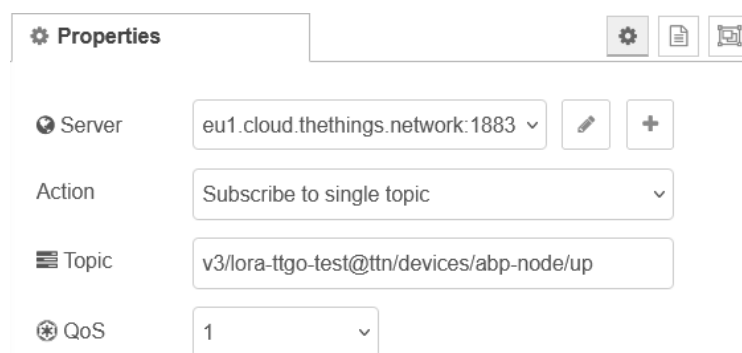


Figura 5.14 - Configuração do nó MQTT.

Com o nó MQTT configurado, a ligação entre o servidor LoRaWAN e o *Node-RED* é estabelecida, o que possibilita o desenvolvimento do *flow* ilustrado na Figura 5.15.

O próximo nó do *flow* é responsável pelo tratamento das mensagens recebidas em formato *JavaScript Object Notation* (JSON). Para além do *payload* proveniente do nó final, estas mensagens incluem também um conjunto de metadados que necessitam de ser filtrados. Este nó atua como um *decoder* que extrai os bytes do *payload*, identifica se este corresponde a uma mensagem de alerta ou de dados e descodifica os bytes para um formato legível. No caso das mensagens de alerta, os bytes são convertidos em data e hora, enquanto as mensagens de dados são convertidas nas componentes de aceleração. Adicionalmente, o *decoder* utiliza os metadados disponíveis para extrair o valor de RSSI associado a cada mensagem recebida.

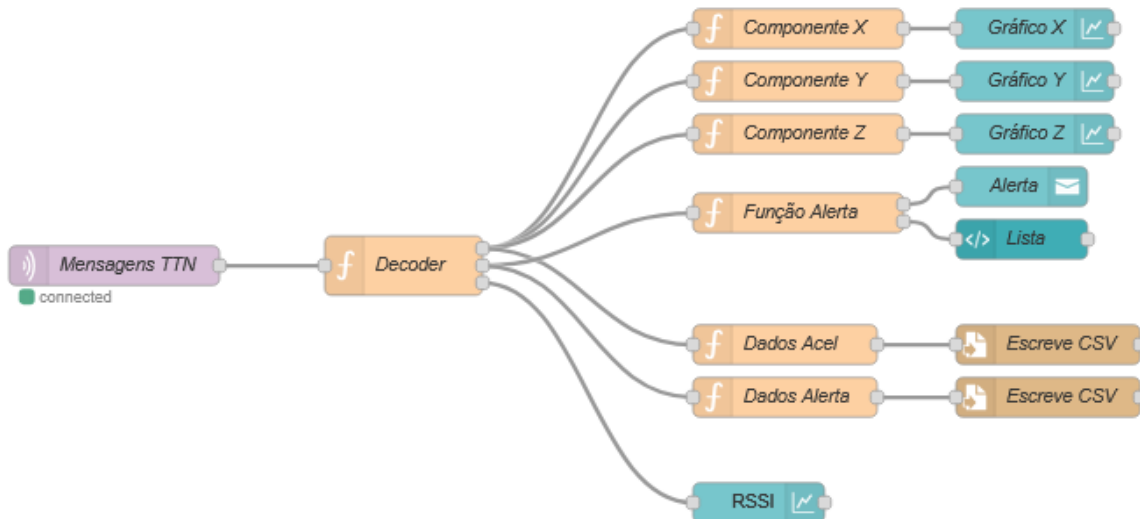


Figura 5.15 - Flow Node-RED.

Cada tipo de dados é encaminhado para um conjunto de nós distintos, responsáveis por implementar as diferentes funcionalidades da interface.

Entre estas funcionalidades encontra-se a mensagem *pop-up* da Figura 5.16. Esta mensagem é acionada sempre que um alerta sísmico é recebido e apresenta a data e hora do início do evento.

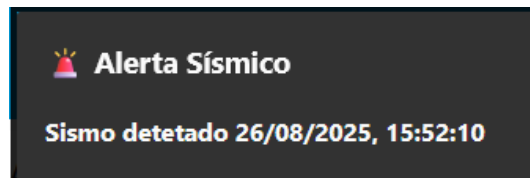


Figura 5.16 - Mensagem *pop-up* de alerta sísmico.

A interface inclui ainda um *dashboard* com duas janelas, onde diferentes dados podem ser consultados. A primeira janela, presente na Figura 5.17, contém uma lista com a data e hora da ocorrência dos últimos 5 eventos detetados, assim como 3 gráficos com o registo temporal das componentes de aceleração X,Y e Z, em m/s^2 , do último evento. Estes gráficos são atualizados à medida que as mensagens de dados são recebidas, tendo em conta a hora presente na mensagem de alerta e o ritmo de amostragem utilizado no nó final, de forma a apresentar os dados de maneira mais correta possível em termos temporais.

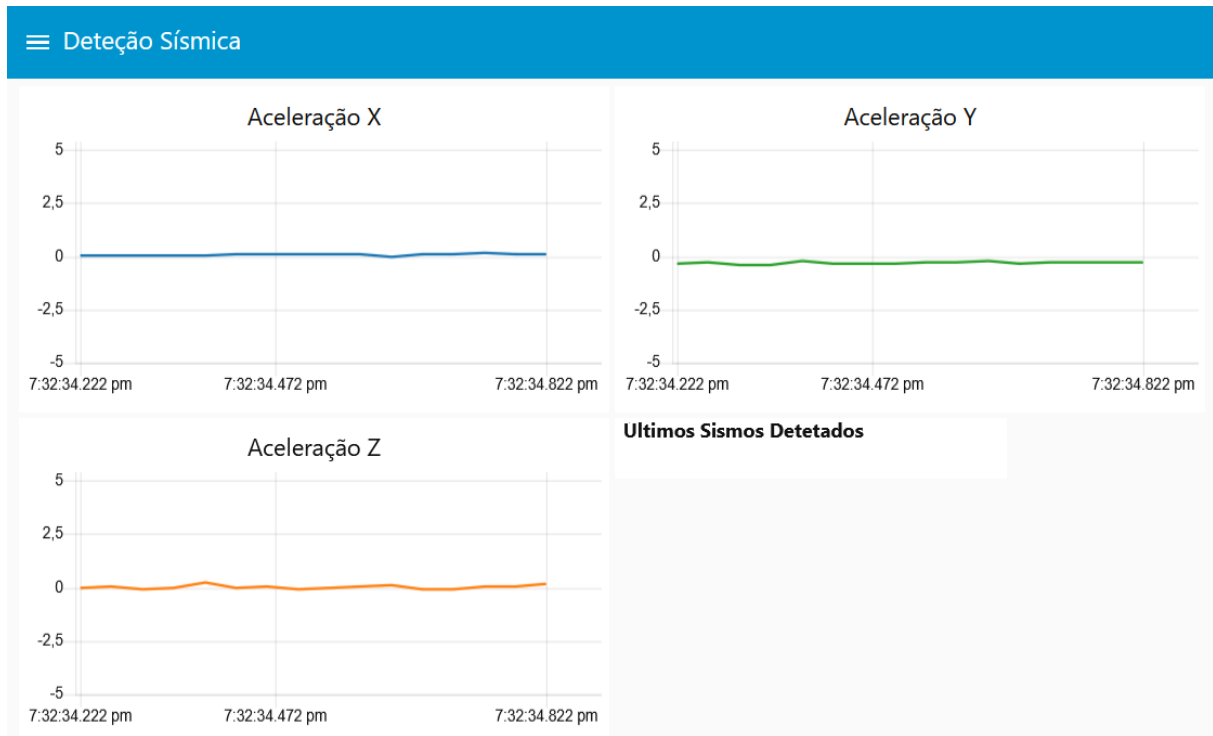


Figura 5.17 - Dashboard: Janela "Detecção Sísmica".

A segunda janela, ilustrada na Figura 5.18, apresenta um gráfico com a evolução temporal do valor de RSSI, em dBm, de cada mensagem recebida.

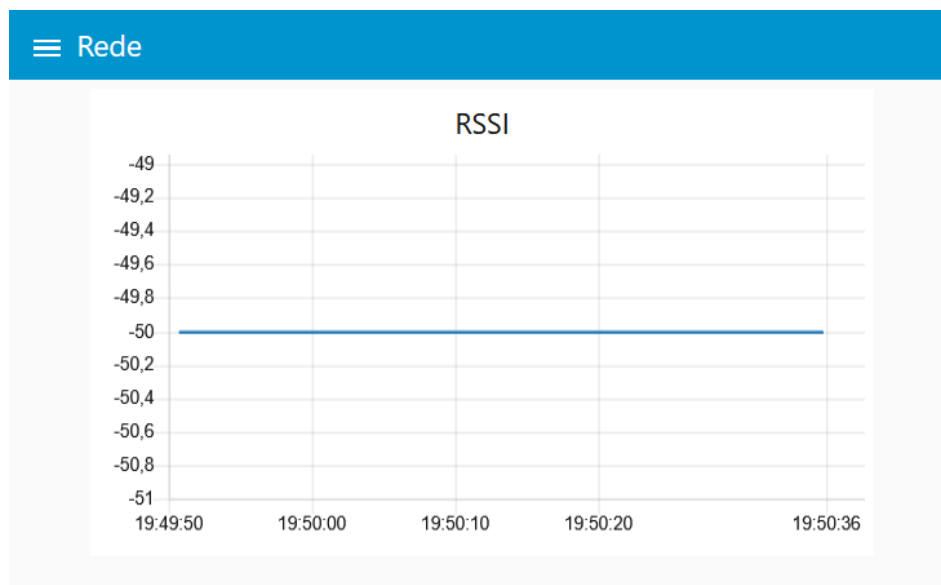


Figura 5.18 - Dashboard: Janela "Rede".

Para além da mensagem *pop-up* e do *dashboard*, é gerado um ficheiro *Comma-Separated Values* (CSV) para cada evento sísmico, que contém informação sobre a data e hora da ocorrência, amostras de aceleração e respetiva frequência de amostragem. Um exemplo do conteúdo do ficheiro CSV pode ser visualizado na Figura 5.19.

	A	B	C
1	Sismo detetado 26/08/2025, 15:52:10		
2	Freq 25 Hz		
3	Accel_X,Accel_Y,Accel_Z		
4	0.824,0.941,0.271		
5	1.255,1.177,0.154		
6	-0.941,-1.373,0.193		
7	-1.491,-1.726,-0.003		
8	0.628,0.588,0.114		
9	1.530,1.138,-0.003		
10	-0.353,-0.549,-0.082		
11	0.196,-0.510,0.114		
12	0.235,-0.431,0.154		

Figura 5.19 - Exemplo de um ficheiro CSV gerado.

Este ficheiro pode ser utilizado posteriormente para uma análise mais detalhada dos dados obtidos.

6. Testes e Resultados

Neste capítulo são apresentados os testes realizados para avaliar a fiabilidade e eficiência energética do sistema projetado, em diferentes cenários. Na secção 6.1 são descritos os modelos de propagação rádio que servem posteriormente como referência para a comparação com os testes de cobertura realizados.

6.1. Modelos de Propagação

Com o intuito de comparar os resultados experimentais com valores teóricos de atenuação, foram considerados dois modelos de propagação: o modelo de espaço livre, *Free Space Path Loss* (FSPL), e o modelo de *Okumura-Hata*. Estes modelos permitem estimar a atenuação que um sinal de rádio sofre ao longo do seu percurso em diferentes tipos de ambiente e serão utilizados como referência para avaliar os valores de *Received Signal Strength Indication* (RSSI) medidos.

6.1.1. Propagação em Espaço Livre

O modelo de propagação em espaço livre é uma aproximação teórica que descreve a atenuação que um sinal eletromagnético sofre quando se propaga ao longo de um meio ideal, sem obstáculos ou reflexões. A fórmula é dada por:

$$L_{FSPL} = 32,44 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \text{ [dB]} \quad (6.1)$$

Onde:

- L_{FSPL} representa a atenuação de percurso, em dB.
- d é a distância em km entre emissor e recetor.
- f é a frequência do sinal rádio, em MHz.

Esta equação assume que existe linha de vista (*Line of Sight* - LoS) entre transmissor e recetor.

A potência do sinal recebido, P_{RX} , pode ser estimada através da Equação (6.2):

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{FSPL} \text{ [dBm]} \quad (6.2)$$

Sendo:

- P_{TX} a potência de transmissão, em dBm.
- G_{TX} e G_{RX} os ganhos das antenas transmissora e recetora, em dBi.

6.1.2. Modelo de Okumura-Hata

Para uma análise mais realista da propagação de um sinal rádio em ambientes não ideais, foi considerado o modelo empírico de *Okumura-Hata*. Este modelo estima a atenuação de percurso tendo em consideração o tipo de ambiente envolvente, frequência do sinal, distância e altura das antenas.

A expressão geral da atenuação para ambientes urbanos, L_{urbano} , é dada pela Equação (6.3):

$$L_{urbano} = 69,5 + 26,16 \log_{10}(f) - 13,82 \log_{10}(h_{tx}) - a(h_{rx}) + (44,9 - 6,55 \log_{10}(h_{tx})) \log_{10}(d) \text{ [dB]} \quad (6.3)$$

Onde:

- f é a frequência do sinal, em MHz.
- h_{tx} e h_{rx} são as alturas das antenas transmissora e recetora, respetivamente, em m.
- d é a distância em km entre antenas.
- $a(h_{rx})$ é o fator de correção dependente da altura da antena recetora.

O termo $a(h_{rx})$ ajusta o impacto da altura da antena recetora na atenuação e varia de acordo com o tipo de cidade:

- Para pequenas/médias cidades:

$$a(h_{rx}) = (1,1 \log_{10}(f) - 0,7)h_{rx} - (1,56 \log_{10}(f) - 0,8) \quad (6.4)$$

- Para grandes cidades e $f \geq 400$ MHz:

$$a(h_{rx}) = 3,2 (\log_{10}(11,75h_{rx}))^2 - 4,97 \quad (6.5)$$

Com base na atenuação calculada para ambiente urbano, é possível estimar as perdas em ambientes menos densos através da aplicação de fatores de correção adicionais:

- Suburbano:

$$L_{suburb} = L_{urbano} - 2 \left(\log_{10} \left(\frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \text{ [dB]} \quad (6.6)$$

- Rural:

$$L_{rural} = L_{urbano} - 4,78 (\log_{10}(f))^2 + 13,83 \log_{10}(f) - 40,94 \text{ [dB]} \quad (6.7)$$

O cálculo da potência recebida é semelhante ao utilizado no modelo de espaço livre, sendo apenas necessário alterar o modelo de propagação utilizado:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{urbano/suburb/rural} \text{ [dBm]} \quad (6.8)$$

6.2. Testes de Cobertura Rádio

Com o objetivo de avaliar o desempenho da comunicação rádio do sistema desenvolvido, foram realizados diversos testes de cobertura em ambiente real. A *gateway* LoRaWAN encontra-se instalada no primeiro andar de uma vivenda localizada na freguesia da Lapa, concelho do Cartaxo, a uma altura aproximada de 5 m em relação ao nível do solo. A Figura 6.1 apresenta a vista a partir do ponto onde se encontra a *gateway*.



Figura 6.1 - Vista da localização da gateway.

A área de testes corresponde a uma região com características suburbanas a rurais, onde é predominante condições de visibilidade não direta (*Non-Line of Sight* – NLOS) entre a *gateway* e os pontos onde se efetuam as medições. Durante os testes, a qualidade da ligação rádio é caracterizada com base na média de três medições consecutivas do valor de RSSI, realizadas em cada ponto de medição. Na Figura 6.2 está representado o mapa com as várias localizações percorridas durante os testes.

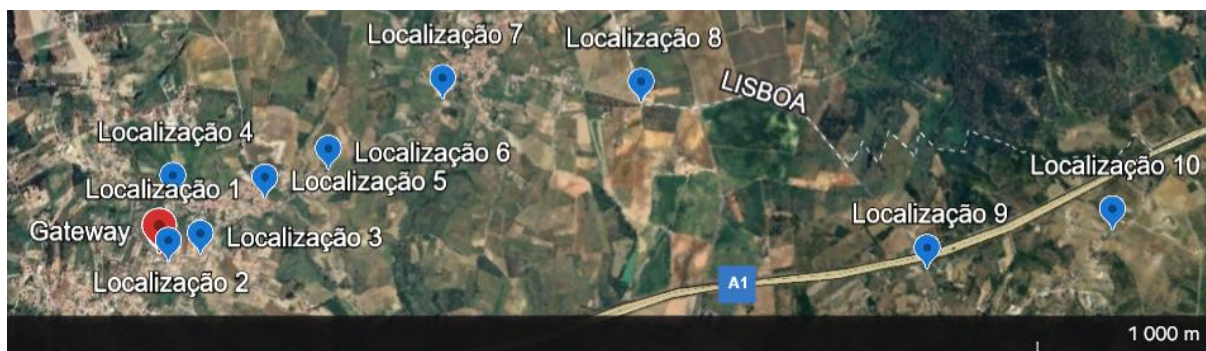


Figura 6.2 - Distribuição espacial dos pontos de medição.

As localizações escolhidas para a realização dos testes foram selecionadas de forma a abranger diferentes cenários de propagação. As primeiras cinco localizações encontram-se a menos de 1 km da *gateway*, inseridas em uma zona com maior densidade de construções e obstáculos, o que representa um ambiente mais complexo do ponto de vista da propagação rádio. As restantes localizações distribuem-se de forma mais dispersa, estendendo-se para áreas com menor densidade habitacional e mais espaço aberto, permitindo avaliar o comportamento do sinal em cenários menos obstruídos.

Durante os testes é utilizada uma largura de banda de 125 kHz e uma potência de transmissão que assume os valores de 8 dBm e 14 dBm, consoante o cenário em análise. Três valores distintos de *Spreading Factor* são utilizados, nomeadamente SF=7, SF=9 e SF=12, de forma a avaliar o impacto desta variável no alcance e qualidade do sinal. O *payload* LoRa transmitido foi ajustado em relação ao capítulo anterior para melhor se adequar ao cenário de testes, e apresenta agora um tamanho fixo de 8 bytes e contém as coordenadas GPS do nó final.

6.2.1. Resultados Teóricos

Com base nas localizações definidas e nas configurações a serem utilizadas durante os testes, procedeu-se à análise teórica da propagação rádio através da aplicação dos modelos FSPL e *Okumura-Hata*. A aplicação do modelo de *Okumura-Hata* considera a altura da *gateway*, a altura do nó final (aproximadamente 1,5 m em relação ao solo) e a cota do terreno em cada ponto de medição, o que permite estimar de forma mais realista a diferença de altitude entre emissor e recetor. São tidas em conta as variantes suburbana e rural do modelo, por serem as que melhor se adequam às características da região de teste. A Figura 6.3 apresenta as curvas teóricas obtidas para cada modelo e potência.

Note-se que tanto a *gateway* como o nó final estão equipados com antenas helicoidais e, embora não exista informação precisa sobre o respetivo ganho, assume-se para efeitos de cálculo um valor típico de 2,15 dBi por antena.

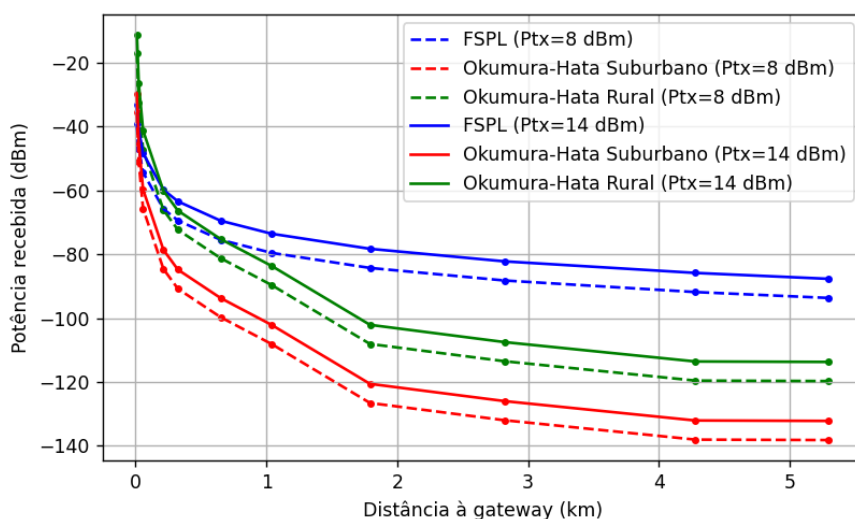


Figura 6.3 - Curvas teóricas para a variação da potência recebida em função da distância, para uma frequência de trabalho de 868 MHz.

Ao analisar o gráfico obtido, verifica-se uma redução progressiva da potência recebida com o aumento da distância, como esperado devido à atenuação do sinal ao longo do percurso. As curvas relativas às potências de transmissão de 8 dBm e 14 dBm apresentam uma diferença constante de 6 dBm, refletindo diretamente a influência da potência de transmissão na intensidade do sinal recebido. A comparação entre os modelos teóricos mostra que o modelo FSPL representa um cenário idealista em espaço livre, enquanto os modelos de Okumura-Hata, mais realistas, apresentam maior atenuação consoante o tipo de ambiente. O modelo rural apresenta menos perdas face ao modelo suburbano, o que é coerente com a natureza menos densa da região em análise.

Tendo em conta as curvas obtidas e os valores típicos de sensibilidade em LoRaWAN para SF=7 (-123 dBm), SF=9 (-129 dBm) e SF=12 (-137 dBm), é possível estimar os alcances teóricos. Para SF=7, a comunicação revela-se fiável até cerca de 2 a 3 km em ambiente suburbano e até à distância máxima testada de 5,3 km em ambiente rural, para ambas as potências de transmissão. No caso de SF=9, tanto com 14 dBm como com 8 dBm é possível atingir os 5,3 km em ambiente rural. Em cenário suburbano, a potência de receção prevista aproxima-se do limiar de sensibilidade para distâncias mais longas, o que pode afetar a fiabilidade da ligação. Para SF=12, ambas as potências asseguram uma receção acima do limiar de sensibilidade em todos os pontos testados.

6.2.2. Resultados Práticos

Os resultados práticos obtidos através dos testes realizados no terreno são apresentados e analisados nesta seção. A Figura 6.4 mostra a variação do RSSI em função da distância à gateway, de modo a avaliar o comportamento real do sinal nas diferentes configurações de

Spreading Factor e potência de transmissão descritas anteriormente. Este gráfico constitui o ponto de partida para a análise do alcance e da qualidade da comunicação LoRa nos cenários testados.

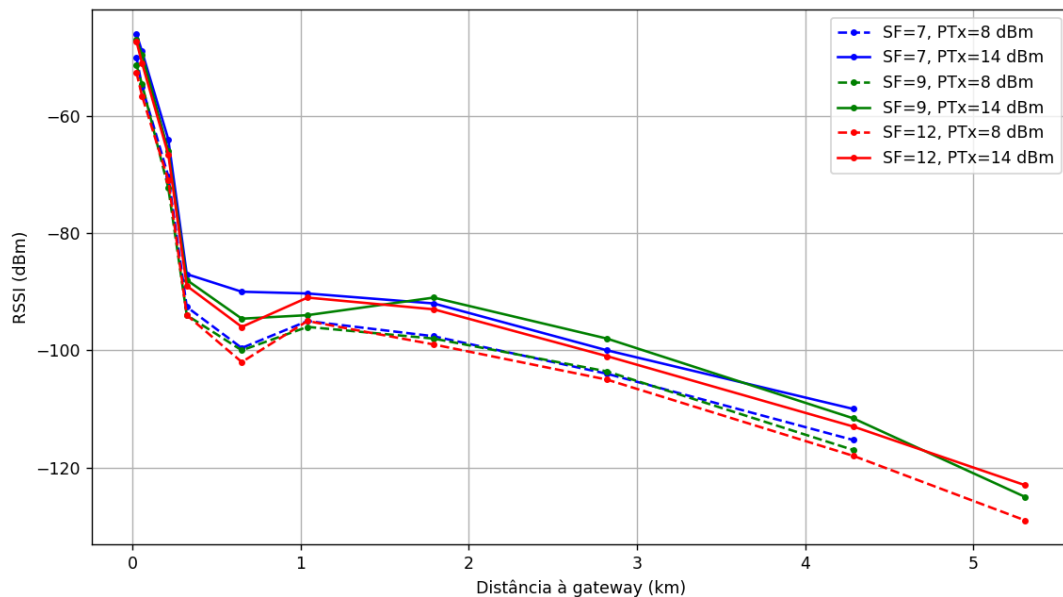


Figura 6.4 - RSSI medido em função da distância à gateway.

Ao comparar os diferentes fatores de espalhamento, verifica-se uma relação clara entre o valor de SF e a distância máxima atingida. Para SF=7, foi possível manter comunicação até cerca de 4,3 km com ambas as potências de transmissão, o que ultrapassa a estimativa de 2 a 3 km em cenários mais exigentes, embora sem alcançar os 5,3 km indicados como possíveis em ambiente rural. No caso de SF=9, o ponto a 5,3 km foi atingido apenas com uma potência de 14 dBm, enquanto com 8 dBm a ligação só alcançou 4,3 km, o que fica aquém da previsão teórica que apontava para 5,3 km em ambas as situações. Já com SF=12, ambas as potências permitem alcançar a distância máxima testada. Foram ainda testadas distâncias superiores, sem que fosse possível detetar qualquer sinal.

Para além do alcance máximo, importa também analisar de que forma diferentes valores de SF influenciam os níveis de RSSI em cada uma das localizações testadas. Para melhor visualizar esse comportamento, foi criado o gráfico de barras da Figura 6.5, no qual se representa o valor de RSSI associado a cada SF para todos os pontos de medição. Dado que o padrão observado se mantém consistente para ambas as potências de transmissão, a análise incide apenas sobre a configuração com 14 dBm.

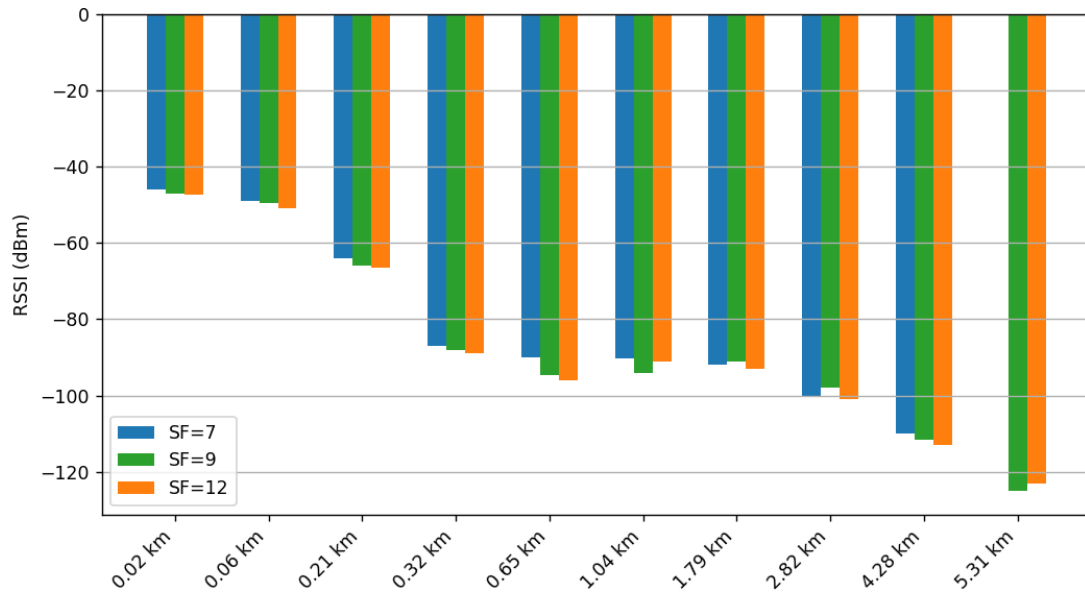


Figura 6.5 - Variação do RSSI em função do SF para diferentes pontos de medição, $P_{tx}=14dBm$.

De modo geral, verifica-se uma tendência para que valores mais elevados de SF apresentem níveis de RSSI mais baixos. Este comportamento é expectável, uma vez que fatores de espalhamento superiores resultam em tempos de transmissão mais longos, o que aumenta a exposição do sinal a fenómenos de atenuação. No entanto, esta redução do RSSI não implica necessariamente pior desempenho, já que valores mais altos de SF proporcionam maior sensibilidade na receção, permitindo manter a comunicação mesmo com sinais mais fracos. Importa ainda referir que o RSSI não depende apenas do SF, sendo também influenciado por fatores como as condições meteorológicas ou por perdas associadas à metodologia adotada durante os testes. Esses fatores podem gerar resultados fora da tendência, como é o caso da localização a 1,04 km da *gateway*, onde SF=9 apresenta o pior RSSI por uma margem considerável.

Ao analisar a evolução das curvas da Figura 6.4, observa-se um comportamento particular a cerca de 1 km da *gateway*, onde, em vários casos, se regista uma subida no RSSI. Este efeito pode estar associado ao facto de, como já mencionado na descrição do cenário de teste, até cerca de 1 km, os pontos de medida situarem-se dentro de uma localidade, com uma maior presença de obstáculos, enquanto a partir dessa distância predomina espaço mais aberto. Este comportamento é suportado pela Figura 6.6, onde se sobrepõe as curvas de RSSI teóricas com a curva prática para o cenário com SF=12 e $P_{TX}=14$ dBm. Verifica-se que, até à localização imediatamente anterior à subida do RSSI, a curva prática apresenta maior proximidade ao modelo de *Okumura-Hata* para ambiente suburbano e, após esse ponto, ocorre uma transição que a aproxima do modelo para ambiente rural.

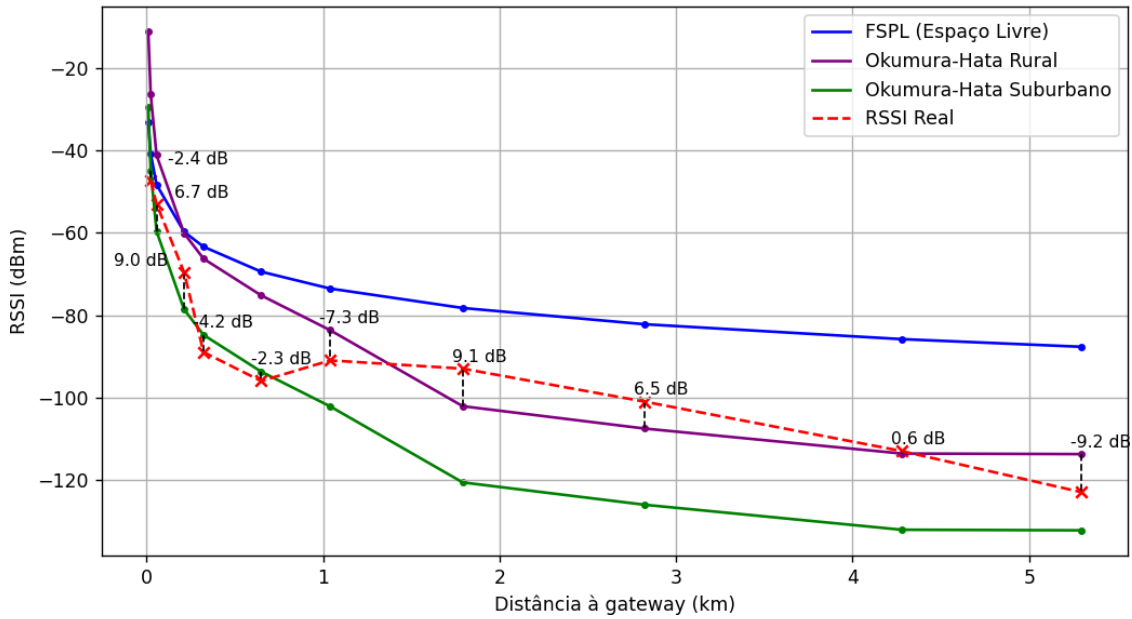


Figura 6.6 - Curvas de RSSI medido vs teórico para $P_{tx}=14$ dBm e $SF=12$.

Na mesma figura, é ainda possível observar, para cada ponto, a diferença entre o valor de RSSI medido e o valor previsto pelo modelo que melhor se ajusta ao ambiente em que as medidas foram efetuadas. Para melhor quantificar essa diferença, recorreu-se ao cálculo do Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE), definido pela Equação (6.9):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (6.9)$$

Onde:

- N é o número total de pontos de medição.
- y_i e \hat{y}_i são, respetivamente, os valores de RSSI medido e previsto pelo modelo teórico.

Ao aplicar esta equação aos dados obtidos, conclui-se que, em média, o modelo de *Okumura-Hata* para ambientes suburbano e rural apresenta um erro de 5,7 dB no cenário de teste implementado.

Por fim, é necessário analisar a influência da redução da potência de transmissão na potência recebida. Para uma melhor visualização, foi elaborada a Tabela 6.1, que apresenta a diferença de RSSI entre as potências de transmissão de 14 dBm e 8 dBm para todas as localizações e fatores de espalhamento considerados.

Tabela 6.1 - Diferença de RSSI entre potências de transmissão de 14 dBm e 8 dBm.

<i>Distância [m]</i>	<i>RSSI_{14dB} – RSSI_{8dB} [dB]</i>		
	<i>SF = 7</i>	<i>SF = 9</i>	<i>SF = 12</i>
20	4,0	4,3	5,3
60	6,0	5,0	5,6
210	6,3	6,3	4,4
320	5,6	6,0	5,0
650	9,6	5,4	6,0
1040	4,7	2,0	4,0
1790	5,6	7,0	6,0
2820	4,0	5,6	4,4
4280	5,3	5,4	5,0
5310	NA	NA	6,0
Média [dB]	5,68	5,22	5,17

A análise dos resultados revela que os valores variam maioritariamente entre 4 e 7 dB, com casos extremos de 9,6 dB aos 650 m com SF=7 e 2,0 dB aos 1040 m com SF=9, sem evidência de um padrão consistente ao longo das distâncias e fatores de espalhamento considerados. No entanto, considerando que a potência transmitida foi reduzida em 6 dB, pode-se concluir que, em média, a redução do RSSI é semelhante à redução da potência transmitida, com médias de 5,68 dB, 5,22 dB e 5,17 dB para SF=7, SF=9 e SF=12 respetivamente.

6.3. Perda de Pacotes

O número de pacotes perdidos constitui outra métrica relevante, uma vez que indica o grau de fiabilidade da ligação num determinado ponto. Para avaliar esta métrica foram seleccionadas 4 das 10 localizações utilizadas nos testes de cobertura, onde em cada uma foram enviadas 10 mensagens com SF=7, SF=9 e SF=12 a uma potência de emissão de 14 dBm. Cada mensagem possui uma dimensão de 48 bytes, seguindo o conteúdo e formato da mensagem de dados descrita no subcapítulo 5.1. Os resultados deste teste estão presentes na Tabela 6.1, onde se observa o número de pacotes recebidos nas condições testadas.

Tabela 6.2 - Pacotes recebidos.

Localização	SF=7	SF=9	SF=12
L3 (210 m)	10/10	10/10	10/10
L8 (2820 m)	9/10	10/10	10/10
L9 (4280 m)	3/10	8/10	7/10
L10 (5310 m)	NA	3/10	6/10

A análise da tabela evidencia que, em curtas a médias distâncias (L3 e L8), a ligação apresenta elevada fiabilidade, com grande parte dos pacotes a serem recebidos independentemente do SF utilizado. A partir da localização L9 verifica-se uma redução significativa da taxa de receção em SF=7, pelo facto de se situar no limite da cobertura que este fator de espalhamento consegue alcançar. No entanto, a utilização de SF=9 e SF=12 permite recuperar a maior parte das mensagens, atingindo respetivamente 8/10 e 7/10 pacotes recebidos. Em L10, a comunicação em SF=7 já não é possível, mas SF=9 e SF=12 ainda asseguram taxas de receção de 3/10 e 6/10, respetivamente.

Estes resultados demonstram que, no cenário testado, o sistema consegue garantir uma transmissão fiável de dados para distâncias até cerca de 3 km, independentemente do SF utilizado. Para distâncias superiores, a utilização de fatores de espalhamento mais elevados é essencial, embora não seja possível atingir níveis de fiabilidade comparáveis aos observados em distâncias mais curtas.

como foi medido? com que equipamento?

6.4. Consumo Energético

A instalação do nó final em localizações em que é inviável a instalação de dispositivos clássicos de monitorização sísmica pode implicar a falta de infraestruturas de acesso a energia elétrica, o que torna o consumo energético um fator importante a considerar para dispositivos que utilizam baterias como fonte principal de energia.

A duração da bateria do nó pode ser estimada a partir do consumo de corrente instantâneo indicado no *datasheet* de cada elemento presente no nó. Para tal, foram definidos quatro estados de operação, que correspondem a diferentes rotinas realizadas, sendo estimado o consumo de corrente de cada uma:

- **Estado 1:** Este estado corresponde à rotina de monitorização e verificação de atividade sísmica, onde é realizada a leitura e avaliação dos dados provenientes do acelerómetro.
- **Estado 2:** Após a confirmação de evento sísmico, este estado faz a aquisição de todos os dados de aceleração a serem enviados.
- **Estado 3:** Envio das mensagens de alerta e de dados via LoRa.
- **Estado 4:** Este estado corresponde à rotina de *sleep*, na qual o nó permanece durante a maior parte do seu ciclo de execução.

Em cada um destes estados, os elementos do nó operam em diferentes modos de consumo, os quais se encontram representados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Modo de consumo de cada elemento do nó.

Estado	ESP32	LoRa SX1276	ADXL345	GPS Neo-6M
E1	Ativo	Em Suspensão	Ativo	Ativo
E2	Ativo	Em Suspensão	Ativo	Ativo
E3	Ativo	Ativo	Ativo	Ativo
E4	Em Suspensão	Em Suspensão	Ativo (baixo consumo)	Ativo

Com base na informação fornecidas pelos *datasheet*, é possível criar a Tabela 6.4 com o consumo instantâneo de cada elemento do nó, nos diferentes modos e configurações de energia utilizadas.

Tabela 6.4 - Consumo instantâneo de cada elemento do nó.

	Ativo [mA]	Em Suspensão / Modo Baixo Consumo [mA]
ESP32	68 (<i>Modem-sleep</i>)	0,15 (<i>Deep-sleep</i>)
LoRa SX1276	29 (Ptx = 13 dBm)	1,6
ADXL345	0,14	0,034
GPS Neo-6M	11 (<i>Power Save</i>)	NA

A soma do consumo de todos os elementos em cada estado permite obter os resultados apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Consumo energético por estado.

Estado	ESP32 [mA]	LoRa SX1276 [mA]	ADXL345 [mA]	GPS Neo-6M [mA]	Total [mA]
E1	68	1,6	0,14	11	80,74
E2	68	1,6	0,14	11	80,74
E3	68	29	0,14	11	108,14
E4	0,15	1,6	0,034	11	12,78

Dada a imprevisibilidade da ocorrência de eventos sísmicos, torna-se difícil determinar com que frequência o sistema executará os estados E1, E2 e E3. Por esse motivo, considera-se uma previsão conservadora de uma execução por dia, da qual resultam os tempos de execução da Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Tempo de execução diária de cada estado.

	E1	E2	E3	E4
Tempo de Execução (s)	30	10	2783	86331,72

O tempo de execução do estado E3 corresponde ao período necessário para o envio de 12000 bytes, incluindo o tempo de *duty-cycle*, resultantes de amostras de 12 bytes adquiridas a uma frequência de 100 Hz durante 10 s. Estes dados são segmentados em mensagens de 48 bytes, às quais se adiciona o envio da mensagem de alerta com 8 bytes de informação. O envio é realizado com SF=7 e largura de banda de 125 kHz.

Com estes dados é possível calcular a capacidade diária, em mAh, necessária para cada estado de execução:

- **Estado 1:** 0,028 mAh.
- **Estado 2:** 0,009 mAh.
- **Estado 3:** 3,45 mAh.
- **Estado 4:** 12,77 mAh.

A soma dos resultados anteriores indica que o nó final necessita de aproximadamente 16,25 mAh para a execução de um ciclo diário. Tendo em conta a capacidade de 2600 mAh da bateria utilizada, o nó é capaz de se manter operacional por cerca de 160 h. É importante notar que, embora não tenha sido implementada, soluções tradicionais em sistemas deste tipo, como painéis solares, poderiam ser utilizadas para aumentar a autonomia.

6.5. Ensaio Final

Esta secção apresenta os resultados de um cenário adicional, cujo objetivo é reproduzir condições de utilização próximas da aplicação prática do sistema. Como ilustrado na Figura 6.7, a *gateway* permanece na localização considerada no subcapítulo 6.2, enquanto o nó final foi colocado a aproximadamente 751 metros de distância, na Boca da Lapa. Este cenário é caracterizado por um ambiente maioritariamente rural com condições de visibilidade NLOS.

A Boca da Lapa é uma gruta natural onde se localiza uma nascente de água, em torno da qual foi edificada há várias décadas uma estrutura utilizada pela população local para banhos e lavagem de roupa, sendo apenas acessível por uma estrada de terra batida devido à sua localização relativamente isolada em relação à restante localidade. Atualmente, o espaço é considerado património histórico e cultural da freguesia.

Por estas razões, a Boca da Lapa constitui uma localização onde a aplicação de um sistema de monitorização sísmica, como o desenvolvido na presente dissertação, pode assumir especial relevância, de modo a preservar e garantir a segurança do património local.

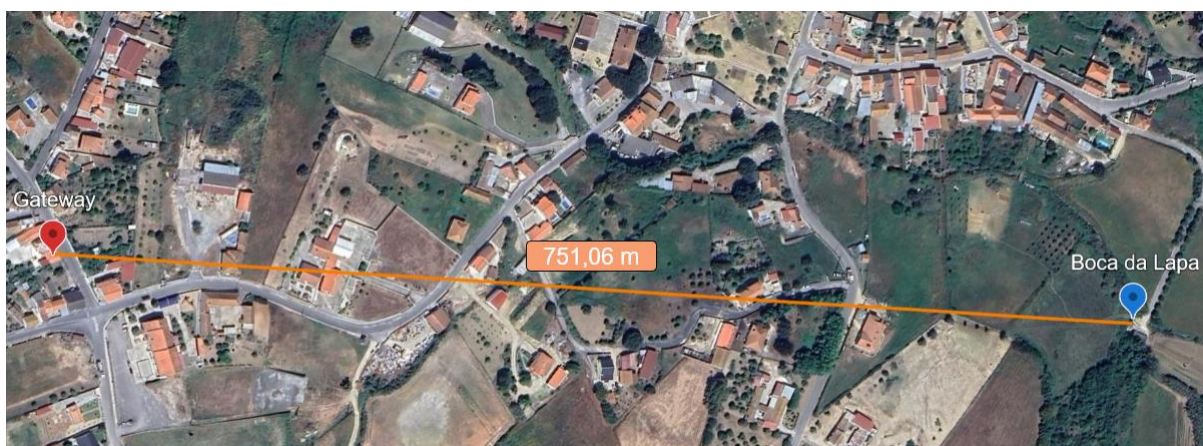


Figura 6.7 - Cenário de teste.

Os testes foram realizados no dia 16 de setembro de 2025, às 14h54, com a configuração SF=7, CR=4/5, largura de banda de 125 kHz e potência de emissão de 14 dBm.

Devido à baixa probabilidade de ocorrência de atividade sísmica, a detecção de um sismo foi apenas simulada por ativação manual do sistema, através da oscilação da estrutura onde o nó se encontra instalado. Para tal foi também aplicado um modelo de ML mais simples de modo a facilitar a detecção.

Após a detecção, o sistema efetuou o registo dos valores de aceleração das três componentes durante 4 segundos, procedendo de seguida ao envio dos dados via LoRaWAN. Dos 26 pacotes enviados, 24 foram recebidos com sucesso, o que corresponde a uma taxa de receção de aproximadamente 92%.

Na Figura 6.8, são apresentados os dados de aceleração recebidos pela interface de utilizador desenvolvida na secção 5.4, juntamente com a data e hora de início da ocorrência.

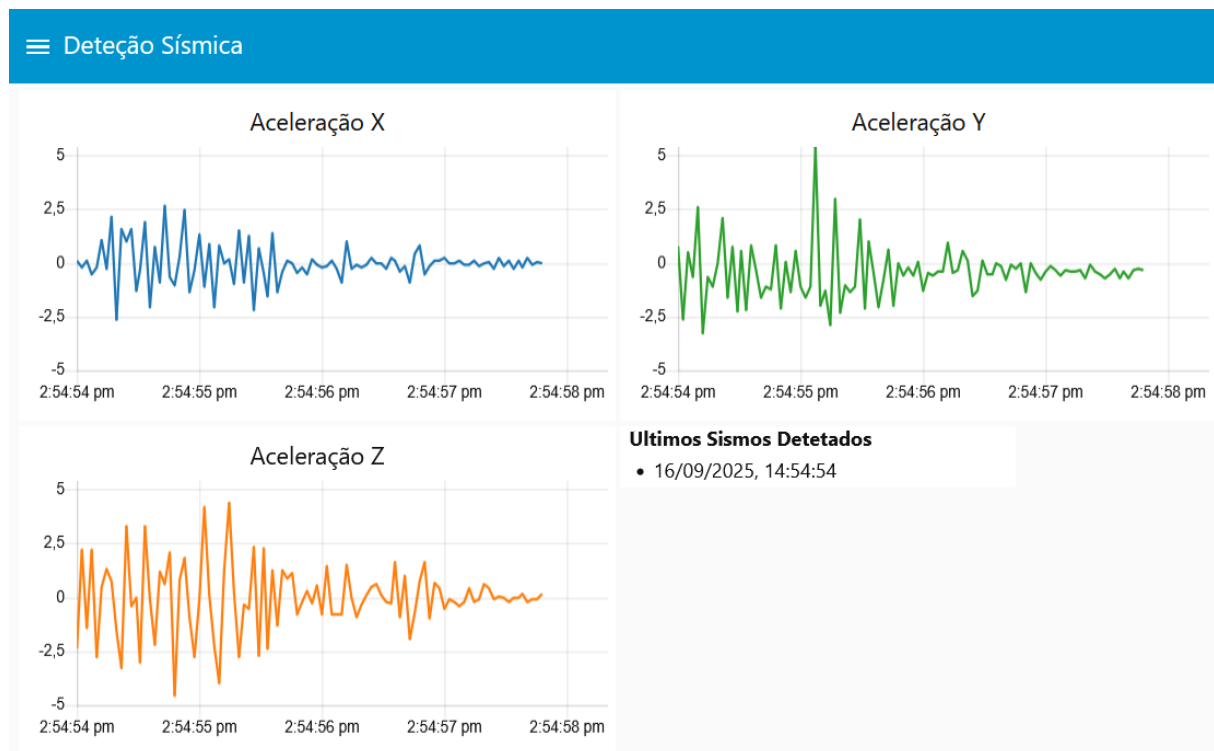


Figura 6.8 - Janela "Detecção Sísmica" da interface de utilizador (Ensaio Final).

Na segunda janela da interface, presente na Figura 6.9, verifica-se a evolução do RSSI das mensagens recebidas ao longo do ensaio, com a maioria dos valores a situarem-se entre -84 e -92 dBm.

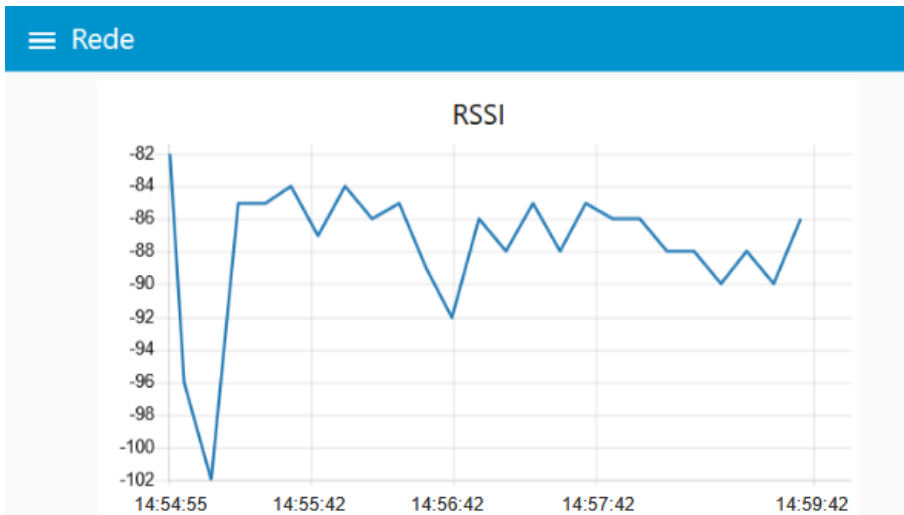


Figura 6.9 - Janela "Rede" da interface de utilizador (Ensaio Final).

Em suma, os resultados obtidos confirmam o bom funcionamento de todas as componentes do sistema, desde a deteção sísmica e a aquisição dos dados de aceleração até ao seu envio e apresentação numa interface organizada e de fácil compreensão.

7. Conclusões e Trabalho Futuro

O principal objetivo desta dissertação focou-se no *design* e implementação de um sistema IoT de baixo consumo energético, orientado para a deteção precoce de eventos sísmicos em locais de difícil acesso ou onde a instalação de equipamentos tradicionais de monitorização sísmica se revela inviável. Para tal, foi dado especial ênfase à utilização de componentes comerciais de baixo custo, nomeadamente sensores acelerómetros do tipo MEMS, de forma a garantir a viabilidade económica e a escalabilidade do sistema. O sistema incluiu a implementação de uma rede LoRaWAN com recurso ao servidor da TTN, com o intuito de avaliar a viabilidade desta tecnologia na transmissão de dados sísmicos, bem como o desenvolvimento de uma interface em *Node-RED* para visualização em tempo real da informação recebida. Para deteção de atividade sísmica, o sistema integra um modelo de ML implementado diretamente no nó final .

Relativamente à cobertura e fiabilidade da comunicação via LoRa, o sistema foi avaliado em cenários de teste predominantemente NLOS, em ambiente suburbano a rural. As medições realizadas mostraram que é possível alcançar distâncias superiores a 5 km quando se utilizam fatores de espalhamento mais elevados, enquanto com SF inferiores a cobertura decresce para cerca de 4 km. Para assegurar uma taxa de receção de pacotes igual ou superior a 90% em qualquer configuração de SF, a distância máxima reduz-se para valores abaixo dos 3 km. Apesar desta redução, os resultados obtidos comprovam o quão robusta e fiável a tecnologia LoRa é, quando utilizada em sistemas IoT de baixo consumo e potências de transmissão.

No entanto, deve também ser considerado que, para criar uma representação fiável de um sismograma, é necessário enviar um volume relativamente grande de dados via LoRaWAN que, com o cumprimento das restrições de *duty-cycle*, pode aumentar o tempo total de transmissão das mensagens para mais de 30 minutos.

Em termos de consumo energético, foram aplicadas várias medidas para redução do consumo do nó final, nomeadamente a implementação de uma rotina *sleep* no *firmware* do nó, que reduz o consumo dos vários módulos presentes. Estas medidas possibilitam ao nó final manter um consumo médio relativamente baixo e atingir uma autonomia superior a 160 horas.

Um desenvolvimento futuro deste sistema envolve a realização de testes de longa duração com múltiplos nós em diferentes localizações, com o objetivo de avaliar a robustez e a fiabilidade do sistema em condições mais representativas de monitorização sísmica real, e comparar os resultados com os fornecidos por instituições oficiais. Para tal, será necessário reforçar a fixação dos nós com uso de materiais mais resistentes, de modo a garantir a estabilidade e a durabilidade dos dispositivos. A integração de painéis solares constitui uma

possível solução para aumentar a autonomia do sistema. A gestão do elevado volume de dados gerados pode ser solucionada através da aplicação de métodos de compressão e/ou da integração de uma segunda tecnologia de comunicação, mantendo a tecnologia LoRa/LoRaWAN para a transmissão de informações críticas e de baixo volume, como mensagens de alerta.

Referências

- [1] A. Manso, «Design and Prototyping of a Network-Enabled Low-Cost Low-Power Seismic Sensor Monitoring System», Universidade de Évora, 2021.
- [2] J. Ferreira, «História da Sismologia em Portugal», Universidade de Évora, 2013.
- [3] Instituto Português do Mar e Atmosfera, «Sismo de 26 de agosto de 2024 a W de Sines». Acedido: 29 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.ipma.pt/pt/media/noticias/news.detail.jsp?y=2024&f=noticia_sismo_agosto.html
- [4] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, «Rede Sísmica Portuguesa». Acedido: 29 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/geofisica/redes/>
- [5] R. Azevedo, L. Pires, e V. Fialho, «Low-Power IoT Seismic Detection with Machine Learning Integration», *2025 9th International Young Engineers Forum on Electrical and Computer Engineering (YEF-ECE)*, pp. 139–144, Jul. 2025, doi: 10.1109/YEF-ECE66503.2025.11117492.
- [6] «Clube de Geofísica - Sismometria». Acedido: 29 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://clubedegeofisica.aefp.pt/sismometria/>
- [7] J. Lima, «Sistema de Monitorização de Vibrações baseado numa arquitetura REST para IoT», Universidade do Minho, 2016.
- [8] M. Azevedo, «Caracterização de um acelerómetro polimérico piezoresistivo», Universidade do Minho, 2013.
- [9] W. Niu *et al.*, «Summary of Research Status and Application of MEMS Accelerometers», *Journal of Computer and Communications*, vol. 6, pp. 215–221, 2018, doi: 10.4236/jcc.2018.612021.
- [10] S. A. Al-Qaseemi, H. A. Almulhim, M. F. Almulhim, e S. R. Chaudhry, «IoT architecture challenges and issues: Lack of standardization», *FTC 2016 - Proceedings of Future Technologies Conference*, pp. 731–738, Jan. 2017, doi: 10.1109/FTC.2016.7821686.
- [11] M. Lombardi, F. Pascale, e D. Santaniello, «Internet of Things: A General Overview between Architectures, Protocols and Applications», *Information 2021, Vol. 12, Page 87*, vol. 12, n. 2, p. 87, Fev. 2021, doi: 10.3390/INFO12020087.
- [12] R. Figueiredo, «Desenvolvimento de um Sistema de Controlo e Monitorização Residencial Através de Tecnologias Associadas à Internet das Coisas», Universidade do Minho, 2019.

- [13] «Semtech Semiconductor». Acedido: 3 de Outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.semtech.com/>
- [14] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hänninen, e M. Pettissalo, «On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology», *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2015*, pp. 55–59, Jan. 2016, doi: 10.1109/ITST.2015.7377400.
- [15] R. M. Cristino, «Evaluation of Narrowband Technologies in Urban Environments Internet of Things», 2017.
- [16] SEMTECH, «LoRa™ Modulation Basics», 2015.
- [17] LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, «RP002-1.0.2 LoRaWAN® Regional Parameters», 2020.
- [18] W. G. Lima *et al.*, «LoRa Technology Propagation Models for IoT Network Planning in the Amazon Regions», *Sensors 2024, Vol. 24, Page 1621*, vol. 24, n. 5, p. 1621, Mar. 2024, doi: 10.3390/S24051621.
- [19] «LoRa Alliance - Homepage - LoRa Alliance®». Acedido: 5 de Outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/>
- [20] M. A. M. Almuhaaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, e S. Abdulmalek, «A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions», *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, n. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11010164.
- [21] «LoRaWAN® | The Things Network». Acedido: 3 de Outubro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- [22] K. E. Nolan, W. Guibene, e M. Y. Kelly, «An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things», *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2016*, pp. 439–444, Set. 2016, doi: 10.1109/IWCMC.2016.7577098.
- [23] T. Bouguera, J. F. Diouris, J. J. Chaillout, R. Jaouadi, e G. Andrieux, «Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN», *Sensors 2018, Vol. 18, Page 2104*, vol. 18, n. 7, p. 2104, Jun. 2018, doi: 10.3390/S18072104.
- [24] R. S. Sinha, Y. Wei, e S. H. Hwang, «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT», *ICT Express*, vol. 3, n. 1, pp. 14–21, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.ICTE.2017.03.004.
- [25] Y. D. Beyene *et al.*, «NB-IoT Technology Overview and Experience from Cloud-RAN Implementation», *IEEE Wirel Commun*, vol. 24, n. 3, pp. 26–32, 2017, doi:

- 10.1109/MWC.2017.1600418.
- [26] A. Ukovich, «NB-IoT Explained: What Is It, and How Does It Work?» Acedido: 24 de Setembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.telit.com/blog/nb-iot-new-cellular-standard-means-business/>
- [27] «Home - Sigfox 0G Technology». Acedido: 27 de Setembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://sigfox.com/>
- [28] «Callback medium | Sigfox Resources». Acedido: 27 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://support.sigfox.com/docs/callback-medium>
- [29] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, e F. Meyer, «A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment», *ICT Express*, vol. 5, n. 1, pp. 1–7, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.ICTE.2017.12.005.
- [30] P. Boccadoro, B. Montaruli, e L. A. Grieco, «QuakeSense, a LoRa-compliant Earthquake Monitoring Open System», *Proceedings - 2019 IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, DS-RT 2019*, Out. 2019, doi: 10.1109/DS-RT47707.2019.8958675.
- [31] Y. M. Wu, «Progress on Development of an Earthquake Early Warning System Using Low-Cost Sensors», *Pure Appl Geophys*, vol. 172, n. 9, Set. 2015, doi: 10.1007/S00024-014-0933-5.
- [32] Q. Kong, R. M. Allen, L. Schreier, e Y. W. Kwon, «Earth Sciences: MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond», *Sci Adv*, vol. 2, n. 2, Fev. 2016, doi: 10.1126/SCIADV.1501055.
- [33] H. Alimoradi, H. Rahimi, e A. De Santis, «Successful Tests on Detecting Pre-Earthquake Magnetic Field Signals from Space», *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, n. 16, Ago. 2024, doi: 10.3390/rs16162985.
- [34] P. Varotsos, N. Sarlis, e E. Skordas, «Magnetic field variations associated with the SES before the 6.6 Grevena-Kozani earthquake», *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 77, n. 6, pp. 93–97, 2001, doi: 10.2183/PJAB.77.93.
- [35] V. Fialho e F. Azevedo, «Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices», 2018. [Online]. Disponível em: <http://journals.isel.pt>
- [36] Z. J. R. Kamoona e M. Ilyas, «Investigating the Performance of LoRa Communication for Nominal LoRa and Interleaved Chirp Spreading LoRa», *Proceedings - 2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things, ICAIoT 2022*, 2022, doi: 10.1109/ICAIoT57170.2022.10121818.

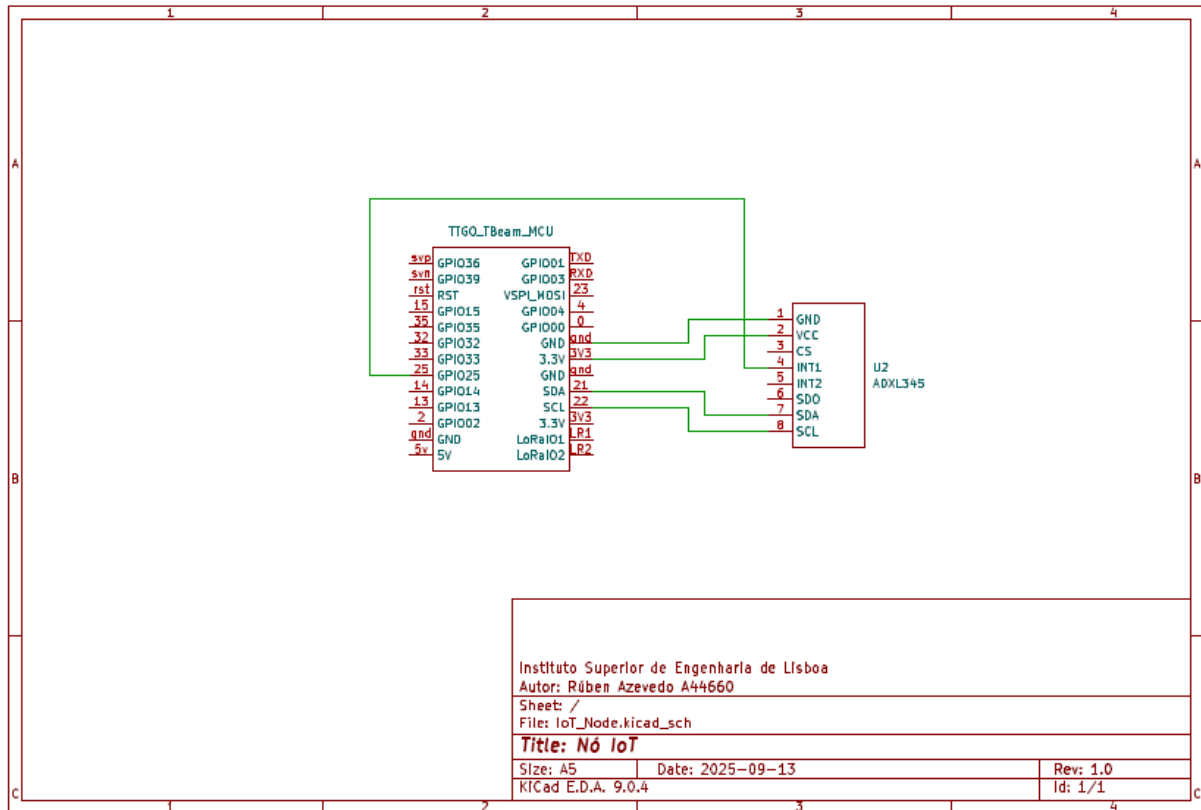
- [37] K. Ntshabele, B. Isong, N. Gasela, e A. M. Abu-Mahfouz, «A Comprehensive Analysis of LoRaWAN Key Security Models and Possible Attack Solutions», *Mathematics 2022*, Vol. 10, Page 3421, vol. 10, n. 19, p. 3421, Set. 2022, doi: 10.3390/MATH10193421.
- [38] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, e C. Gomez, «Modeling the Energy Performance of LoRaWAN», *Sensors 2017*, Vol. 17, Page 2364, vol. 17, n. 10, p. 2364, Out. 2017, doi: 10.3390/S17102364.
- [39] L. M. Pires e J. Martins, «Experimental Study on the Importance of Interference in the Spreading Factor and Effects of Collisions for the LoRaWAN Radio Interface», Jun. 2024, doi: 10.20944/PREPRINTS202406.0538.V1.
- [40] «LoRaWAN® Specification v1.1». Acedido: 30 de Agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/lorawan-specification-v1-1>
- [41] A. Filipe Braz Rabaça, «Aplicação de Tecnologia LoRaWAN à Monitorização de Redes de Distribuição de Energia», *Instituto Superior Técnico*, 2018.
- [42] «T-Beam – LILYGO®». Acedido: 27 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://lilygo.cc/products/t-beam?variant=42204034990261>
- [43] ESPRESSIF, «ESP32 Series Datasheet Version 4.8».
- [44] Semtech, «SX1276/77/78/79 DataSheet».
- [45] uBlox, «Neo-6 GPS Modules DataSheet», 2011.
- [46] Analog Devices, «ADXL345 (Rev. G)».
- [47] «Módulo acelerómetro digital - 3 Eixos [$\pm 16g$] (ADXL-345)». Acedido: 16 de Fevereiro de 2025. [Online]. Disponível em: https://mauser.pt/catalog/product_info.php?products_id=096-0408
- [48] InvenSense Inc., «MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.3», 2012.
- [49] Dragino, «LG02/OLG02 LoRa Gateway User Manual Document Version: 1.6.1». [Online]. Disponível em: www.dragino.com
- [50] «The Things Network». Acedido: 31 de Janeiro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [51] «Node-RED». Acedido: 26 de Agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://nodered.org/>
- [52] «MQTT - The Standard for IoT Messaging». Acedido: 15 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://mqtt.org/>

- [53] «MQTT Essentials - All Core Concepts Explained». Acedido: 26 de Agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.hivemq.com/mqtt/>
- [54] «GitHub - mcci-catena/arduino-lorawan». Acedido: 27 de Agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://github.com/mcci-catena/arduino-lorawan>
- [55] «TensorFlow Lite para microcontroladores». Acedido: 27 de Agosto de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.tensorflow.org/lite/microcontrollers?hl=pt-br>
- [56] «USGS.gov | Science for a changing world». Acedido: 29 de Março de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>
- [57] «LilyGo_TBram_V1.2-lastest», Acedido: 13 de Setembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGo-LoRa-Series/tree/master/schematic>

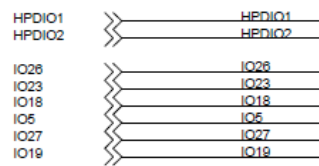
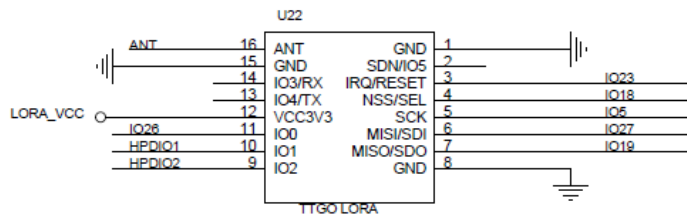
Anexos

Anexo A: Esquemas Eléctricos do Nó Final

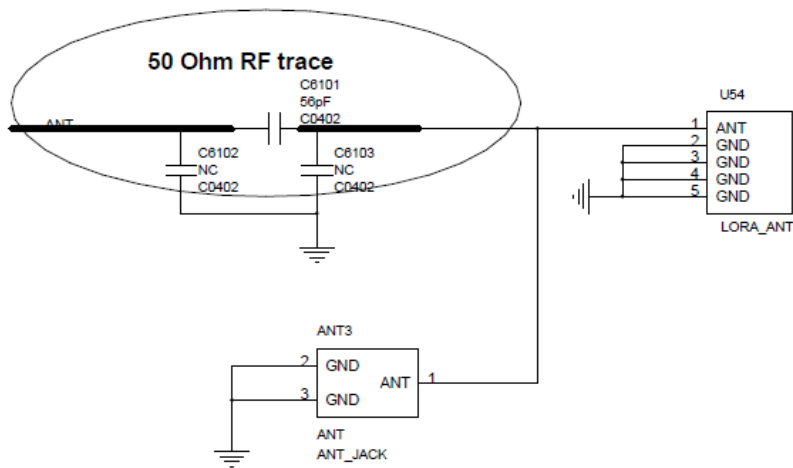
Ligações com módulos externos: Acelerómetro ADXL345



Ligações Internas: Módulo LoRa SX1276 (retirado de [57])



IO23=IRQ/RESET
 IO18=NSS/SEL
 IO6=SCK
 IO27=MISO/SDI
 IO19=MISO/SDO
 IO26=DI0/IO0



Ligações Internas: Módulo GPS NEO-6M (retirado de [57])

