



**José Pedro
de Almeida
Ferreira**

Deteção de Colisões em Rails de Estradas



**José Pedro
de Almeida
Ferreira**

Deteção de Colisões em Rails de Estradas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. José Alberto Gouveia Fonseca, Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Dr. Joaquim José de Castro Ferreira, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente:

Professor Doutor António José Ribeiro Neves

professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Arguente Principal:

Professora Doutora Fernanda de Madureira Coutinho

professora adjunta do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Orientador:

Professor Doutor José Alberto Gouveia Fonseca

professor associado da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me acompanharam durante este meu percurso acadêmico.

Ao professor José Alberto Fonseca pelo auxílio prestado e pelas palavras de ajuda durante a realização desta dissertação.

À minha namorada, Daniela Cardoso, pela paciência, pelo apoio incondicional e pela confiança demonstrada ao longo de todos estes anos.

Aos meus amigos, João Quintela, João Verdasca, Simão Lucas, Raphael Carvalho e Luís Ferreira, pela ajuda disponibilizada durante este trabalho e por todos os momentos de companheirismo.

Por último, um agradecimento especial à minha família por todos os sacrifícios, pelo suporte e por terem depositado confiança no meu trabalho.

A todos, o meu muito obrigado!

Palavras Chave

Rails, IoT, Sensores, MEMS, Comunicações, *Wireless*, LPWAN, LoRa, LoRaWAN, ITS, WSN, ADXL345, SX1276, RFM95W

Resumo

Os dispositivos de retenção (rails) são estruturas básicas de segurança rodoviária, sendo importante manter a sua integridade através de uma manutenção adequada.

A verificação destas estruturas, por parte das empresas de manutenção, é efetuada manualmente. A monitorização remota destes dispositivos permite uma melhor deteção de qualquer impacto, de modo a realizar uma reparação/substituição mais eficaz.

Uma rede de sensores sem fios, de baixa potência e de baixo custo, pode ser implementada para a deteção remota de qualquer colisão.

Nesta dissertação, está presente o desenvolvimento de uma ligação ponto-a-ponto desta rede e a sua possível implementação global. Esta ligação possui uma comunicação baseada em LoRa e uma deteção de impacto através de um acelerómetro MEMS.

Keywords

Guardrails, IoT, Sensors, MEMS, Communication, *Wireless*, LPWAN, LoRa, LoRaWAN, ITS, WSN, ADXL345, SX1276, RFM95W

Abstract

The guardrails are basic road safety structures and it's important to maintain their integrity through proper maintenance.

The verification of these structures is carried out manually, by the maintenance companies. A remote monitorization of these devices allows for a better detection, of any impact, and a more effective repair/replacement.

A low-cost, low-power wireless sensor network can be implemented for remote collision detection.

This dissertation presents the development of a point-to-point connection of this network and its possible global implementation. This connection features LoRa communication and impact detection via a MEMS accelerometer.

Índice

Índice.....	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas.....	vii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Estrutura	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Sensores	3
2.1.1. Sensores Piezoelétricos	5
2.1.2. Sensores Piezoresistivos.....	6
2.1.3. Sensores MEMS Capacitivos	6
2.1.4. Sensores de Medida de Tensão	9
2.1.5. Comparação dos Tipos de Sensores Analisados	9
2.1.6. Especificações de um Acelerómetro	10
2.2. Comunicação.....	14
2.2.1. Sigfox	15
2.2.2. LoRa/LoRaWAN	16
2.2.3. NB-IoT	19
2.2.4. Comparação dos Principais Fatores de IoT.....	21
3. Arquitetura do Projeto.....	25

3.1. Rede de Sensores Sem Fios	26
3.1.1. Desafios das WSNs	27
3.1.2. Estrutura das WSNs	28
3.1.3. Estrutura de um Nó de Sensor	30
3.2. Arquitetura Geral do Sistema.....	32
4. Descrição e Implementação dos Dispositivos	35
4.1. Sensor (ED).....	35
4.1.1. Modo de Funcionamento.....	37
4.1.2. Tipo de Comunicação.....	37
4.1.3. Implementação do Sensor	38
4.2. LoRa (ED e <i>Gateway</i>).....	40
4.2.1. Descrição Geral	41
4.2.2. Modulação <i>Chirp Spread Spectrum</i>	43
4.2.3. Modem LoRa.....	44
4.2.4. <i>Spreading Factor</i>	45
4.2.5. Taxa de Codificação.....	46
4.2.6. Largura de Banda	46
4.2.7. Estrutura do Pacote.....	47
4.2.8. Interface Digital.....	49
4.2.9. Modos de Operação.....	50
4.2.10. Máquina de Estados	50
4.2.11. Interface SPI.....	55
4.2.12. Transmissor	55
4.2.13. Recetor	56
4.2.14. Implementação do End Device	58
4.2.15. Implementação da <i>Gateway</i>	59
5. Testes e Resultados	61
5.1. Montagem dos Equipamentos.....	61
5.2. Calibração do Acelerómetro	63
5.3. Teste de GPS.....	64
5.4. Configurações	64
5.5. Teste Urbano (1 km)	66

5.6. Teste Rural (3 km)	68
5.7. Teste Rural (9 km)	70
5.8. Análise dos Testes Realizados	72
6. Conclusões e Trabalho Futuro	75
Referências	77
Anexos.....	81
Anexo 1 – Especificações do Acelerómetro ADXL345 [27]	81
Anexo 2 – Consumo de Corrente vs. Taxa de Dados (ADXL345) [27].....	82
Anexo 3 – Mapa de Registos (ADXL345) [27].....	83
Anexo 4 – Lista das Principais Funções para o ADXL345	83
Anexo 5 – Caraterísticas Elétricas dos Módulos SX1276 e RFM95W (LoRa) [31]	84
Anexo 6 – Mapa de Registos (LoRa) [31]	87
Anexo 7 – Lista das Principais Funções para o SX1276/RFM95W (LoRa)	94

Lista de Figuras

<i>Figura 1 – Componentes da tecnologia MEMS.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 – Princípio de funcionamento de um acelerómetro MEMS capacitivo [11]</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 – Comparação das tecnologias de comunicação.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 – Stack de protocolo da tecnologia LoRa/LoRaWAN [20]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 – Arquitetura do LoRa/LoRaWAN [21]</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6 – Modo de funcionamento de uma classe A [20]</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 – Modo de funcionamento de uma classe B [20]</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8 – Modo de funcionamento de uma classe C [20].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9 – Diferentes operações do NB-IoT [15].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10 – Comparação dos fatores de IoT nas principais tecnologias de LPWAN [15].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 – Esquema global dos sistemas de transporte inteligente (ITS) [22].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12 – Topologia estrela (star) [23]</i>	<i>29</i>
<i>Figura 13 – Topologia em malha (mesh) [23].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14 – Topologia híbrida (hybrid) [23].....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 15 – Componentes de um nó de sensor [23]</i>	<i>31</i>
<i>Figura 16 - Stack de protocolo [23].....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 17 – Arquitetura geral do sistema</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18 – Diagrama de sequência de uma colisão</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19 – Ligação ponto-a-ponto entre ED e gateway.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20 - Diagrama de blocos do acelerómetro ADXL345 [27].....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 21 – Diagrama do protocolo I²C (esquerda) e respetiva ligação do ADXL345 (direita) [27] [28]</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22 – Condensadores de desacoplamento (esquerda) e placa com o sensor ADXL345 (direita) [29]....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 23 – Esquema de ligações entre a placa do ADXL345 e o Arduino [29].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 24 – Fluxograma de teste do sensor ADXL345</i>	<i>40</i>
<i>Figura 25 – Diagrama de blocos simplificado do SX1276 [31].....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 26 – Exemplos dos sinais up-chirp e down-chirp [20] [33]</i>	<i>44</i>
<i>Figura 27 – Exemplo de uma mensagem codificada em sinais chirp [20]</i>	<i>44</i>
<i>Figura 28 – Esquema do modem LoRa [31]</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29 – Estrutura de um pacote LoRa [31].....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 30 – Buffer de dados [31]</i>	<i>50</i>
<i>Figura 31 – Sequência de transmissão de dados [31].....</i>	<i>51</i>

<i>Figura 32 – Sequência de recepção de dados [31].</i>	52
<i>Figura 33 – Processo de detecção de atividade no canal (CAD) [31]</i>	54
<i>Figura 34 – Configuração interna dos amplificadores de potência [31].</i>	55
<i>Figura 35 – Esquema do valor de RSSI no recetor [20]</i>	57
<i>Figura 36 – Esquema da ação do nível de ruído num sinal e o valor de SNR [20]</i>	57
<i>Figura 37 – Shield de LoRa/GPS (esquerda) e circuito prático do ED (direita) [34]</i>	58
<i>Figura 38 – Fluxograma do dispositivo final (ED)</i>	59
<i>Figura 39 – Placa com módulo RFM95W (esquerda) e circuito prático do AP (direita) [35]</i>	60
<i>Figura 40 – Fluxograma da gateway (ponto de acesso, AP)</i>	60
<i>Figura 41 – Esquema da montagem utilizada para realização de testes práticos</i>	61
<i>Figura 42 – Exemplo de teste de comunicação de dados e dos respetivos valores de RSSI e SNR</i>	62
<i>Figura 43 – Calibração do acelerómetro ADXL345 [27].</i>	63
<i>Figura 44 – Dados do sensor de GPS (esquerda) e distância de erro entre valor real e valor obtido (direita)</i>	64
<i>Figura 45 – Distância do teste urbano de 1 km</i>	66
<i>Figura 46 – Valores de RSSI para teste de 1 km.</i>	66
<i>Figura 47 – Valores de SNR para teste de 1 km.</i>	67
<i>Figura 48 – Distância do teste rural de 3 km</i>	68
<i>Figura 49 - Valores de RSSI para teste de 3 km</i>	68
<i>Figura 50 - Valores de SNR para teste de 3 km.</i>	69
<i>Figura 51 - Distância do teste rural de 9 km.</i>	70
<i>Figura 52 - Valores de RSSI para teste de 9 km</i>	70
<i>Figura 53 - Valores de SNR para teste de 9 km.</i>	71
<i>Figura 54 - Margem de sensibilidade para teste de 3 km.</i>	72
<i>Figura 55 - Margem de sensibilidade para teste de 9 km.</i>	73

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Comparação dos diferentes tipos de sensores estudados para diversas aplicações [8]</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 2 – Comparação de custos das tecnologias de LPWAN [15]</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 3 – Resumo das características principais das tecnologias de LPWAN [15]</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 4 – Pinos da placa do ADXL345 e ligações ao Arduino [29]</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 5 – Intervalo de valores para o spreading factor (SF) [31]</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 6 – Diferentes taxas de codificação (CR) [31]</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 7 – Diferentes opções de largura de banda (BW) [31]</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 8 – Modos de operação do modem LoRa [31]</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 9 – Lista dos equipamentos utilizados nos testes práticos</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 10 – Valores de calibração do sensor ADXL345</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 11 – Configurações da comunicação LoRa</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 12 – Desvio padrão relativo do RSSI e SNR e taxa de envio (1 km)</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 13 - Desvio padrão relativo do RSSI e SNR e taxa de envio (3 km)</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 14 - Desvio padrão relativo do RSSI e SNR e taxa de envio (9 km)</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 15 – Valores típicos de sensibilidade [31]</i>	<i>72</i>

Lista de Abreviaturas

3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
AC – *Alternating Current*
ADC – *Analog to Digital Converter*
AES – *Advanced Encryption Standard*
AFC – *Automatic Frequency Correction*
AGC – *Automatic Gain Control*
ANACOM – *Autoridade Nacional de Comunicações*
ANS – *Acordo de Nível de Serviço*
ANSR – *Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária*
AP – *Access Point*
BW – *Bandwidth*
CAD – *Channel Activity Detection*
CPU – *Central Processing Unit*
CR – *Coding Rate*
CRC – *Cyclic Redundancy Check*
CSS – *Chirp Spread Spectrum*
D-BPSK – *Differential Binary Phase-Shift Keying*
DC – *Direct Current*
ED – *End Device*
ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*
FDMA – *Frequency Division Multiple Access*
FEC – *Forward Error Correction*
FIFO – *First In, First Out*
FSK – *Frequency-Shift Keying*
GFSK – *Gaussian Frequency-Shift Keying*
GMSK – *Gaussian Minimum-Shift Keying*
GND – *Ground*
GPS – *Global Positioning System*
GSM – *Global System for Mobile communication*
HDOP – *Horizontal Dilution of Precision*
HF – *High Frequency*
I²C – *Inter-Integrated Circuit*

IDE – *Integrated Development Environment*
IEPE – *Integrated Electronics Piezo-Electric*
IoT – *Internet of Things*
IP – *Internet Protocol*
ISM – *Industrial, Scientific and Medical*
ISR – *Interrupt Service Routine*
ITS – *Intelligent Transport Systems*
LAN – *Local Area Network*
LF – *Low Frequency*
LNA – *Low Noise Amplifier*
LPWAN – *Low Power Wide Area Network*
LSB – *Least Significant Bit*
LTE – *Long-Term Evolution*
MAC – *Media Access Control*
MEMS – *Microelectromechanical Systems*
MSK – *Minimum-Shift Keying*
OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OOK – *On-Off Modulation*
PA – *Power Amplifier*
PLL – *Phase-Locked Loop*
PWM – *Pulse Width Modulation*
QoS – *Quality of Service*
QPSK – *Quadrature Phase-Shift Keying*
RAM – *Random-Access Memory*
RF – *Radio Frequency*
RMS – *Root Mean Square*
RSSI – *Received Signal Strength Indicator*
SF – *Spreading Factor*
SLA – *Service Level Agreement*
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*
SPI – *Serial Peripheral Interface*
TCXO – *Temperature Compensated Crystal Oscillator*
TDOA – *Time Difference of Arrival*
ToS – *Time on Air*
TTN – *The Things Network*
UHF – *Ultra High Frequency*
WSN – *Wireless Sensor Network*

1. Introdução

A rede rodoviária portuguesa é composta por 17874 km, dos quais 3087 km fazem parte da rede de autoestradas (dados de junho de 2016) [1]. Com o aumento do número de veículos, e o respetivo crescimento da rede rodoviária, o número de acidentes é um problema constante. Um dos elementos desenhado para proteger o despiste de veículos é designado por dispositivo de retenção, mais conhecido por rail (*guardrail*, em inglês).

Segundo o relatório anual de sinistralidade da Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR), no ano de 2018, ocorreram 34235 acidentes com vítimas (feridos e/ou mortos). Destes, o número de despistes com um dispositivo de retenção foi de 526 e o número de despistes com a transposição do mesmo foi de 158 [2]. Estes elementos têm como principal função a absorção da energia das colisões dos veículos, aumentando assim a segurança dos seus intervenientes.

Durante uma colisão, a absorção de grande parte desta energia resulta em deformações na estrutura metálica do rail, devido ao seu efeito de amortecimento e retenção. Após uma deformação significativa, o dispositivo deixa de possuir as características necessárias para poder reter um novo impacto, pelo que necessita de ser consertado ou substituído. O número de sinistros com rails representa uma pequena percentagem dos acidentes/despistes que ocorrem todos os anos, no entanto, com os avanços tecnológicos dos últimos anos, exige-se a redução destes valores, nomeadamente o número de transposições. Assim, assegurar uma manutenção periódica, de modo a manter o bom funcionamento de toda a rede de proteção rodoviária, é extremamente importante.

Os contratos entre os operadores de estradas e as empresas de manutenção têm acordos de nível de serviço (ANS), também conhecidos como *service level agreements* (SLAs). Um destes acordos é baseado na necessidade de reparar os dispositivos danificados num breve período temporal, por exemplo num período de 24 horas, após um impacto significativo.

Um dos problemas deste sistema advém, maioritariamente, do desconhecimento das colisões por parte das empresas de manutenção que necessitam de verificar manualmente toda a rede de dispositivos de retenção.

1.1. Objetivos

A solução proposta baseia-se na sensorização dos elementos de retenção que, juntamente com um modelo de comunicação, podem otimizar o processo de verificação e, conseqüentemente, detetar de uma forma mais rápida a respetiva necessidade de manutenção. Procura-se assim implementar um sensor de impacto para rails de estradas capaz de detetar cada impacto significativo e comunicá-lo às autoridades competentes.

O objetivo final deste projeto passa por criar uma rede de aparelhos capazes de detetar e comunicar as colisões, em pontos críticos de acidentes/despistes (*black spots*), assegurando o melhor desempenho das estruturas metálicas.

Numa primeira fase pretende-se estudar e desenvolver uma ligação ponto-a-ponto entre um aparelho de deteção e um aparelho de comunicação, de modo a garantir a funcionalidade destes processos.

Na fase seguinte deve ser estudada a estrutura global do sistema e uma possível implementação de cada ponto da rede e, visto tratar-se de uma aplicação remota, existe também a necessidade de planear alguns métodos de poupança de energia para os aparelhos portáteis.

1.2. Estrutura

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos principais:

- 1º capítulo: introdução do trabalho proposto e descrição dos objetivos;
- 2º capítulo: análise das duas principais áreas do projeto (sensorização e comunicação);
- 3º capítulo: apresentação da estrutura global do projeto;
- 4º capítulo: descrição e implementação dos dispositivos propostos;
- 5º capítulo: exposição dos testes efetuados e dos resultados obtidos;
- 6º capítulo: conclusão do trabalho e algumas sugestões de trabalho futuro.

Por último, apresentam-se as referências e os anexos utilizados.

2. Estado da Arte

Neste capítulo pretende-se fazer uma introdução à parte sensorial do projeto, que engloba um estudo dos sensores disponíveis, e também uma breve introdução dos tipos de comunicações sem fios mais relevantes.

2.1. Sensores

Um sensor é um dispositivo usado para medir uma propriedade (pressão, posição, temperatura, aceleração, entre outras) e disponibilizar, na sua saída, uma resposta proporcional.

Os principais tipos de sensores estão descritos na seguinte lista [3] [4]:

- Sensores acústicos;
- Sensores de fluxo;
- Sensores de nível de líquidos;
- Sensores ambientais (qualidade do ar, humidade, fumo);
- Sensores de temperatura;
- Sensores químicos;
- Sensores biométricos;
- Sensores óticos;
- Sensores foto-óticos;
- Sensores de capacidade;
- Sensores de corrente;
- Sensores magnéticos;
- Sensores ultrassónicos;
- Sensores de pressão;
- Sensores de torque;

- Sensores de força;
- Sensores de piezo;
- Sensores de posição;
- Sensores de proximidade;
- Sensores de velocidade;
- Sensores inerciais (giroscópios, inclinómetros, acelerómetros, sensores de vibração).

Em primeiro lugar, a escolha de um sensor para esta aplicação necessita de ter em atenção as várias características de cada um destes tipos, tendo o conhecimento de que se procura detetar uma deformação, que pode ser compreendida como uma vibração ou uma aceleração.

Tendo em conta as propriedades físicas que estão englobadas na lista proposta, apenas um pequeno grupo de sensores pode ser utilizado para este propósito. Deste modo, um sensor de choque, ou impacto, necessita de detetar e recolher informação sobre um embate sofrido pelo objeto onde se encontra afixado. Este tipo de sensor está incluído na área dos sensores inerciais, que incluem acelerómetros e sensores de vibração. Aliás, o design da maioria dos acelerómetros prevê a medição de algum tipo de impacto bem como dos dados de aceleração. Estes sensores são desenhados para detetar um movimento instantâneo, ou até grandes vibrações, e produzir um valor de saída proporcional à força física que lhe é aplicada. Atualmente, existe uma vasta gama de pequenas aplicações práticas que recorrem a sensores de impacto para obter diversas informações, sendo de destacar: a deteção de toque (*tap*), a proteção de discos rígidos, o transporte de encomendas, o sistema de segurança automóvel e sistemas de alarme [5].

Decorria o ano de 1687 quando *Sir* Isaac Newton redigiu que “*todo corpo continua no seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja forçado a mudar de estado por forças aplicadas sobre ele*”. Esta lei ficou conhecida com princípio da inércia (primeira lei de Newton) e é um dos conceitos básicos da mecânica clássica e a base dos sensores inerciais. Estes têm como objetivo entender os efeitos das forças aplicadas aos sistemas onde se encontram inseridos, e que fazem com que mudem de estado inercial [6].

Um acelerómetro é um dispositivo eletromecânico capaz de medir forças de aceleração. Estas podem ser estáticas, como a força constante da gravidade, ou dinâmicas, quando exercidas através de algum movimento ou vibração do dispositivo [7].

De modo a simplificar, existem três categorias principais para aplicações que necessitam de acelerómetros: movimento, vibração e choque. O movimento é definido como mudanças lentas de posição ou velocidade, tal como o movimento humano. A vibração é definida como um movimento oscilante em torno de uma posição de equilíbrio, por exemplo a monitorização de um motor elétrico e a deteção de ressonância. O choque é definido com uma mudança brusca da aceleração do dispositivo, geralmente levando à excitação da frequência de ressonância da estrutura. São exemplos deste último tipo os testes de queda, testes de colisões e testes de amortecimento.

Estes sensores podem ser de quatro tipos distintos: acelerómetros piezoelétricos,

acelerômetros piezoresistivos, acelerômetros MEMS capacitivos e medidores de tensão.

No entanto, antes de perceber a diferença entre estes tipos é necessário entender a diferença entre a resposta de corrente contínua (DC, em inglês *direct current*) e a resposta de corrente alternada (AC, em inglês *alternating current*).

Um acelerômetro de resposta DC consegue efetuar medições até aos 0 Hz, característica necessária para medir o vetor de gravidade e outras acelerações sustentadas. Existe também a necessidade desta resposta em aplicações de choque onde é preciso integrar os dados de aceleração para obter os respectivos valores de velocidade ou deslocamento. Os acelerômetros que não possuem esta resposta têm uma função intrínseca de decaimento que resultará num erro significativo durante a integração numérica, especialmente em eventos de longa duração.

Um acelerômetro de resposta AC descreve um acoplamento de corrente alternada e, portanto, não pode medir acelerações estáticas, como a aceleração gravítica, ou até mesmo vibrações lentas. Existem, no entanto, acelerômetros de alta sensibilidade capazes de leituras até 0.1 Hz. Este tipo de dispositivo pode ser a melhor opção para testes de vibração, devido à sua ampla resposta em frequência e à alta relação sinal/ruído [8].

2.1.1. Sensores Piezoelétricos

Os sensores piezoelétricos são um dos tipos mais utilizados para medir choques, devido à sua robustez e adaptabilidade. Estes dependem de um material piezoelétrico, geralmente um cristal de quartzo ou um material cerâmico policristalino, para detetar mudanças de força. O efeito piezoelétrico refere-se ao acumular de carga elétrica num material, devido ao seu *stress* mecânico. A distribuição interna é efetuada com algum tipo de material piezoelétrico colocado próximo de uma massa sólida. Quando são aplicadas forças ao dispositivo, o material responde à compressão, ou tensão, fornecida pela massa. Devido ao princípio fundamental da dinâmica, também conhecido como a segunda lei de Newton (1), a mudança na carga elétrica do material é igual à força que age contra ele, permitindo que o sensor consiga medir efetivamente o impacto [5].

$$\vec{F} = m * \vec{a} \quad (1)$$

Este tipo de sensor é bastante utilizado em aplicações de teste e medição, sendo a melhor escolha para medições de vibração, devido à grande resposta em frequência, boa sensibilidade e fácil instalação. Possuem ainda níveis de ruído muito baixos, uma característica importante para testes de choque e vibração. Por outro lado, não são uma boa opção para aplicações que necessitem de dados de velocidade ou deslocamento, pois não conseguem medir acelerações estáticas, devido ao acoplamento AC, que não permite medições de vibração abaixo de alguns hertz (Hz). Estes dispositivos requerem ainda um amplificador de carga que pode ficar saturado quando o sensor fica sujeito a forças

superiores ao alcance máximo de medição, sendo importante selecionar o mais adequado para a aplicação desejada. Dentro deste tipo existem ainda duas formas distintas: acelerômetros piezoresistivos de modo de carga (útil em ambientes extremos de temperatura) e acelerômetros piezoelétricos com eletrônica integrada e de modo de tensão (*Integrated Electronics Piezo-Electric*, IEPE) [8].

2.1.2. Sensores Piezoresistivos

Os sensores piezoresistivos são semelhantes aos piezoelétricos exceto na saída, visto que esta se apresenta sob a forma de uma alteração na resistência, em vez de uma alteração na carga elétrica.

Com uma resposta DC, este tipo de sensor possui uma largura de banda muito ampla, permitindo a medição de choques de curta duração (alta frequência), como testes de colisões. Estes acelerômetros podem ser amortecidos por meio de um gás ou fluido, de modo a proteger o próprio dispositivo, e ampliando o intervalo dinâmico, ao impedir que seja atingida a frequência de ressonância interna. Devido ao acoplamento DC (medições até 0 Hz), estes dispositivos podem também ser usados para calcular, com bastante precisão, informações de velocidade ou deslocamento. Além de terem uma sensibilidade muito baixa, o que não se torna útil para testes de vibração precisos, são ainda sensíveis a variações de temperatura, sendo necessária uma compensação, geralmente efetuada de forma interna. Devido às suas características, são bastante mais caros que os acelerômetros MEMS capacitivos, podendo este ser um fator decisivo quando se pretende implementar um sistema *low-cost*, embora sejam a melhor opção para medições de impulsos e impactos, onde o alcance de frequência e amplitude são tipicamente elevados [8].

Estes são tipicamente fabricados como semicondutores, com circuitos resistivos separados para cada eixo a ser medido. Cada eixo inclui vários piezoresistores, que diminuem o seu valor resistivo quando é aplicada uma força. Este tipo de sensor, desenhado para medições de choques e impactos, é projetado para ter medidores de tensão de semicondutores que oferecem uma maior estabilidade. Uma das desvantagens dos sensores piezoresistivos é a probabilidade de vibrações de choque, que tendem a ter frequências mais altas que as vibrações normais ou que as forças típicas de aceleração, fazendo com que os sensores vibrem à frequência natural de ressonância. Na melhor das hipóteses, a excitação à frequência de ressonância faz com que se registem leituras anormalmente altas, enquanto que, na pior das hipóteses, pode até danificar ou destruir o sensor [5].

2.1.3. Sensores MEMS Capacitivos

Os sistemas microeletromecânicos (*microelectromechanical systems*, MEMS) são

uma tecnologia de fabrico, que incorpora elementos mecânicos e eletromecânicos, e que pode ser utilizada para produzir acelerómetros. Os acelerómetros MEMS capacitivos operam com base nas alterações de capacidade de uma massa sísmica sob aceleração [8].

Esta tecnologia foi primeiramente desenvolvida, em 1967, pelo Eng. Harvey Nathanson, sob a forma de um transistor de porta ressonante. A partir dos anos 80 começou a ser verdadeiramente explorada devido aos diversos avançados tecnológicos da época (microeletrónica). Devido a estes avançados, apresenta atualmente elementos com dimensões físicas que podem variar desde menos de um micrómetro até uma escala de vários milímetros. Assim, os tipos de dispositivos MEMS podem variar de estruturas relativamente simples até sistemas extremamente complexos e com vários elementos móveis, sob o controlo de microeletrónica integrada. Os elementos funcionais que mais utilizam a tecnologia MEMS são micro-sensores e micro-atuadores, sendo estes classificados com transdutores pela sua capacidade de converter energia de uma forma para outra. Os micro-sensores são responsáveis por detetar mudanças físicas (mecânicas, neste caso) e convertê-las num sinal elétrico proporcional, capaz de ser processado pela microeletrónica [9] [10].

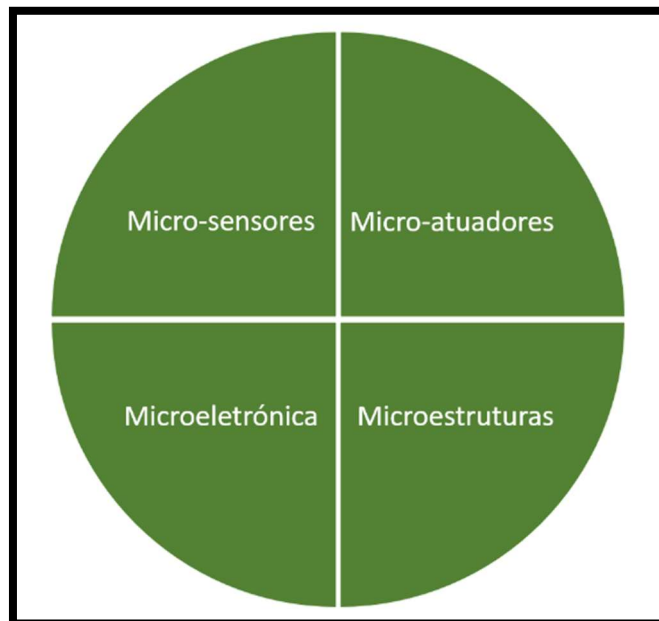


Figura 1 – Componentes da tecnologia MEMS

A figura 1 apresenta os diferentes componentes da tecnologia MEMS. O seu verdadeiro potencial começa quando os sensores de dimensões reduzidas podem ser incorporados juntamente com os circuitos integrados (microeletrónica), num substrato de silício comum. Enquanto que os componentes eletrónicos são fabricados através de sequências de processo de circuito integrado (semicondutores), os componentes mecânicos são produzidos usando um processo de micro-fabrico, gravando seletivamente partes da fatia de silício ou adicionando novas camadas estruturais para formar os dispositivos mecânicos e eletromecânicos.

Embora os níveis mais complexos de integração sejam o futuro da tecnologia MEMS, a complexidade atual é ainda modesta e, geralmente, incorpora um, ou mais, micro-sensores ou um, ou mais, micro-atuadores, podendo conter ainda alguma eletrônica integrada. Com o futuro melhoramento desta tecnologia, e com uma interligação com a nanotecnologia (habilidade de manipular matéria à escala do átomo, ou da molécula, para produzir dispositivos funcionais), será possível desenvolver produtos cada vez mais “inteligentes”. Esta vertente trará um aumento à aptidão computacional dos produtos, ao mesmo tempo que se ganha uma maior perceção e controlo, através destes micro-sensores (acelerómetros e os demais sensores possíveis de fabricar com esta tecnologia) [10].

A tecnologia MEMS trouxe custos de produção mais baixos e dimensões bastante mais reduzidas. Estes sensores são acoplados a DC e, por isso, mais adequados para medir vibrações de baixa frequência, movimentos e acelerações em estado estacionário. Podem, no entanto, sofrer de uma baixa relação sinal/ruído, de uma largura de banda limitada e, principalmente, de restrições a níveis de aceleração (menos de 200 g). A grande popularidade destes dispositivos deve-se principalmente ao seu baixo custo e à facilidade com que se integram num pequeno sistema elétrico [8].

A sua complexidade faz com que haja uma forte necessidade de calibração e teste. O grau de precisão e confiança do sensor varia consoante fatores externos de temperatura e exposição, mas pode ser influenciado por possíveis ruídos internos ou externos.

Na figura 2 está demonstrado o modo de funcionamento destes dispositivos. Uma massa de silício é suspensa e suportada por molas, também de silício, dando mobilidade à respetiva massa. O sensor, ao estar ligado ao sistema, irá sofrer a ação das forças impostas ao mesmo. Uma variação de velocidade provocará, tendo em conta o princípio da inércia, uma alteração na distância entre as placas fixas e as placas móveis ligadas à massa. No estado de repouso, as capacidades ($C1$ e $C2$, no exemplo da figura) são iguais. Sob o efeito de uma aceleração, estas irão variar consoante o sentido e intensidade das forças que provoquem essa mudança de estado. A partir desse instante, o circuito microeletrónico tem a tarefa de converter os sinais elétricos destas variações numa saída proporcional [6].

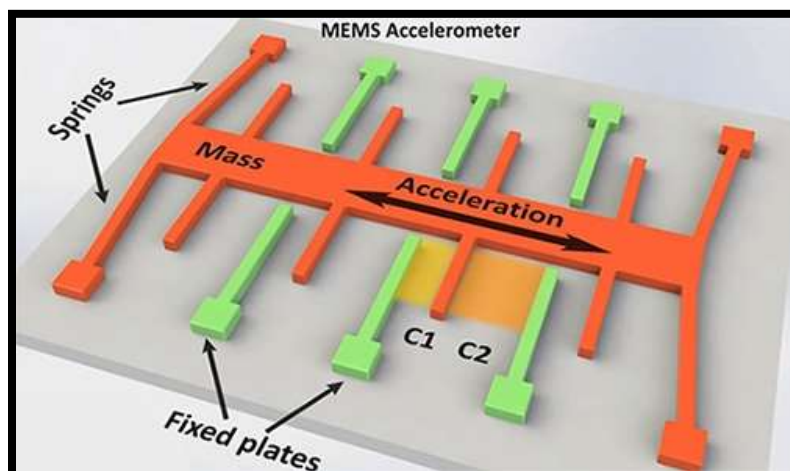


Figura 2 – Princípio de funcionamento de um acelerómetro MEMS capacitivo [11]

2.1.4. Sensores de Medida de Tensão

Os sensores de medida de tensão, ou simplesmente medidores de tensão, são frequentemente utilizados com outros sensores (sensores piezoresistivos, por exemplo). Quando instalados em separado, podem ser colocados estrategicamente em zonas críticas de impacto, onde os choques possam não ser detetados com um sensor de outro tipo [5].

2.1.5. Comparação dos Tipos de Sensores Analisados

Os acelerómetros podem medir a força da gravidade dos sistemas onde se encontram acoplados. A força da gravidade, na Terra, é de 1 g (o padrão científico para 1 g é de 9.8057 m/s²). Em comparação, um passageiro de um avião, numa descolagem, sofre uma aceleração média de 1.8 g e numa montanha-russa pode atingir-se cerca de 3 a 5 g. A partir dos 6 g, um ser humano pode perder a consciência, e aos 10 g estas forças põem em risco o corpo humano. Durante uma colisão, os veículos podem atingir forças com mais de 1000 g [12]. A tabela 1 faz um resumo dos tipos de acelerómetros estudados.

Aplicação	Piezoelétrico	MEMS Capacitivo	Piezo-resistivo
Aceleração Estática (0 Hz, 1 g) Gravidade, Sensor de Orientação		√	√
Força G (0 Hz, <25 g) Foguetes, Aeronaves, Centrifugação		√	√
Sísmica (<1 Hz, <1 g) Terramotos, Ondas, Pontes	√		
Vibração de Baixa Frequência (<5 Hz, <25 g) Movimento Humano, Robótica	√	√	√
Vibração Genérica (5 Hz a 500 Hz, <25 g) Motor Elétrico, Suspensão Automóvel	√	√	
Vibração de Alta Frequência (>500 Hz, <25 g) Análise de Ruído, Turbinas	√		
Impacto Genérico (<100 Hz, <200 g) Testes Genéricos, Testes de Absorção de Choques	√	√	√
Grande Impacto (<250 Hz, >200 g) Testes de Queda	√		√
Impacto Extremo (>1000 Hz, >2000 g) Testes de Colisões de Veículos	√		√

Tabela 1 – Comparação dos diferentes tipos de sensores estudados para diversas aplicações [8]

Segundo os dados estudados, o sensor pretendido deve cumprir os requisitos de um impacto genérico, ou seja, com uma frequência abaixo de 100 Hz e com acelerações de menos de 200 g. Visto que apenas se pretende detetar o impacto sofrido, e não caracterizar as forças envolvidas no embate, estes valores apresentam-se bem estruturados, tendo em conta o objetivo definido. Através da tabela 1 retira-se a informação de que qualquer um dos três tipos estudados se enquadra satisfatoriamente nesta aplicação. O fator decisivo passa então por outras especificações mais próprias e ainda pelo custo de produção de cada sensor. Este fator revela-se extremamente decisivo para uma aplicação *low-cost*, tendo em conta que os sensores piezoelétricos e piezoresistivos rondam valores de dezenas de euros, enquanto que os sensores MEMS capacitivos podem ser produzidos por apenas alguns centímetros.

2.1.6. Especificações de um Acelerómetro

Ao escolher um acelerómetro existem vários fatores e características a ter em conta consoante a aplicação que desejamos executar. As principais especificações são as seguintes [13] [14]:

- **Tipo de Acelerómetro**

Este tema foi abordado nos pontos anteriores sendo que existem 3 tipos principais de acelerómetros: piezoelétricos, piezoresistivos e MEMS capacitivos.

- **Resposta em Frequência (Largura de Banda)**

Este é um parâmetro bastante importante na escolha de um acelerómetro pois não serão obtidos resultados precisos se a largura de banda do dispositivo não incluir a frequência do movimento, vibração ou choque, que se pretende medir. A especificação da resposta em frequência mostra o desvio máximo de sensibilidade numa banda de frequência. A largura de banda é, geralmente, descrita como uma banda de tolerância relativamente à sensibilidade da frequência de referência. As informações da largura de banda permitem conhecer se o acelerómetro consegue medir acelerações lentas ou estáticas, mas também define o limite superior de frequência. Se a faixa mais baixa da largura de banda não atingir 0 Hz (resposta DC), o acelerómetro não consegue medir acelerações estáticas com a gravidade ou vibrações lentas (<2 Hz). A resposta em DC é também indispensável caso haja necessidade de obter valores de velocidade, pela integração dos dados de aceleração, ou de deslocamento, pela respetiva dupla integração. Os acelerómetros que não possuam uma resposta DC têm uma função intrínseca de decaimento, no entanto, introduzem um erro significativo devido à integração numérica, especialmente em eventos de

longa duração. A resposta de frequência de um sensor é tipicamente regida na extremidade de frequência alta, principalmente pela ressonância mecânica do sensor. Um impacto contra um rail gera, normalmente, frequências abaixo dos 100 Hz, pelo que, o sensor escolhido deve conseguir medir acelerações nestas frequências.

- **Sensibilidade**

A sensibilidade de um acelerómetro define a taxa a que o sensor converte energia mecânica num sinal de saída elétrico, o que, consecutivamente, definirá o intervalo de medição. A sensibilidade vem expressa em mV/g (milivolts por g) ou pC/g (picocoulombs por g), onde g é a aceleração gravítica. No entanto, os acelerómetros de saída digital terão este valor expresso em LSB/g (bit menos significativo, *least significant bit*, por g). A sensibilidade desejada irá depender sempre do sinal que se pretende medir, sendo que, para pequenas vibrações, será melhor uma sensibilidade mais alta (sinal mais limpo, maior relação sinal/ruído), e para eventos de choque, será recomendado uma sensibilidade mais baixa. Deste ponto de vista, a sensibilidade não se apresenta como um fator relevante para esta aplicação.

- **Intervalo de Medição**

Esta propriedade define a faixa de amplitude de aceleração que o acelerómetro consegue medir, e é diretamente proporcional à sensibilidade. No entanto, este valor não deverá ser confundido com os limites de choque, que dizem respeito aos níveis de aceleração que podem ser absorvidos antes do dispositivo sofrer danos. Uma boa prática passa por utilizar apenas os 20% da zona mais baixa do intervalo de medição, para garantir margens de medida amplas no caso de acelerações imprevisíveis ou inesperadas. Esta característica tem grande importância nesta aplicação caso se pretenda caracterizar o tipo de impacto sofrido, ou seja, se a colisão foi grave o suficiente ao ponto de danificar o rail totalmente ou se foi apenas um embate ligeiro, sem necessidade de reparação. Nesta primeira fase poderá ser usado um sensor com um intervalo de medição reduzido (até 20 g), pois o objetivo será apenas detetar se ocorreu algum tipo de impacto, quer seja muito grave ou somente ligeiro.

- **Limite de Choque**

Esta característica, como descrita no ponto anterior, representa os níveis de aceleração que podem ser absorvidos antes do próprio sensor sofrer danos irreversíveis. Esta propriedade é também importante neste contexto, embora a maioria dos acelerómetros projetados para este tipo de função apresente limites na ordem dos milhares de força-g (10000 g, por

exemplo). Este tipo de valores possibilita que acelerômetros com intervalos de medição mais reduzidos consigam sustentar grandes impactos sem danificar a sua estrutura interna, embora apresentem a saída saturada.

- **Ruído**

Os níveis de ruído podem ser definidos de várias maneiras diferentes. Alguns acelerômetros definem o ruído residual como um valor eficaz (*root mean square*, RMS) de banda larga, em unidades de μV ou μg . Este valor é calculado com a raiz do valor quadrático médio quando não há qualquer excitação mecânica. Acelerações abaixo do nível de ruído de banda larga não serão resolvidas. A densidade de ruído espectral poderá ser descrita para diferentes intervalos pois os níveis de ruído tendem a cair com frequências mais altas. Assim, o ruído não terá grande influência no momento de um impacto contra um rail, com um sensor devidamente calibrado.

- **Resolução**

A resolução apenas é expressa para acelerômetros de saída digital ou que incorporem um conversor analógico-digital. Por norma, a resolução vem especificada em bits que podem ser usados para calcular este valor em unidades de aceleração. Como não existe a necessidade de caracterização do impacto, não serão necessários muitos bits de resolução para o avaliar (menos de 10 bits), desde que o sensor esteja calibrado para este tipo de situações.

- **Filtragem**

A filtragem pode ser integrada em alguns dispositivos de forma a melhorar a qualidade do sinal. Um filtro passa-alto é inerente a todos os acelerômetros piezoelétricos (resistência e condensador em série), o que fornece uma típica resposta AC a este tipo de sensor. Um filtro passa-baixo é relativamente comum em acelerômetros que necessitem de evitar *aliasing* (identificação incorreta de uma frequência de sinal), que não consegue ser filtrado através de *software*. Resumindo, em acelerômetros digitais, é essencial ter algum tipo de filtragem, nomeadamente após a conversão dos valores.

- **Sensibilidade de Temperatura**

A sensibilidade à temperatura define como a sensibilidade do acelerómetro muda com a temperatura. Estes dispositivos são sistemas mecânicos e, portanto, a temperatura afeta as propriedades mecânicas dos sistemas e, conseqüentemente, a sensibilidade do acelerómetro. Este valor é definido com uma variação percentual por grau Celsius ($\%/^{\circ}\text{C}$). Para

acelerómetros com uma alta sensibilidade de temperatura (por norma, piezoelétricos e piezoresistivos), será necessário algum tipo de compensação para dimensionar a saída de maneira a equilibrar o efeito da temperatura, sendo que esta compensação poderá até já vir incluída em alguns dispositivos. Para esta aplicação espera-se um intervalo de temperaturas que englobe uma completa exposição exterior, ou seja, desde baixas temperaturas noturnas até altas temperaturas diurnas.

- **Sensibilidade Transversal**

A sensibilidade transversal define a sensibilidade do acelerómetro a acelerações ortogonais (de 90°) ao eixo sensível do sensor. Este parâmetro é expresso sob a forma de percentagem e, idealmente, deveria ser 0%, no entanto, devido às tolerâncias de fabrico, esta sensibilidade pode ser de 5% ou 10%, não sendo relevante para a deteção de impacto.

- **Interface de Comunicação**

Estes dispositivos podem comunicar através de interfaces analógicas, digitais ou de *pulse width modulation* (PWM). Os acelerómetros com uma interface analógica mostram acelerações através de níveis de tensão variáveis. Estes valores geralmente variam entre 0 V (GND, *ground*) e a tensão de alimentação. Um conversor analógico-digital num microcontrolador pode depois ser usado para ler esse valor. Os acelerómetros com uma interface digital podem comunicar através dos protocolos de comunicação, *serial peripheral interface* (SPI) ou *integrated circuit* (I²C). Estes tendem a ter mais funcionalidades e são menos suscetíveis ao ruído. Por último, os acelerómetros podem também enviar os seus dados através de PWM, produzindo ondas quadradas com um período conhecido e com um *duty-cycle* variável. Esta variação representa as respetivas mudanças na aceleração. Uma interface de ligação I²C apresenta-se como a mais vantajosa em termos de atenuação de ruído, embora as outras interfaces possam também ser utilizadas.

- **Potência**

Normalmente, os acelerómetros apresentam-se como dispositivos de baixa potência. A corrente necessária pode vir na ordem dos microamperes (μA) ou dos miliamperes (mA), consoante a tensão de alimentação. O consumo de corrente varia também dos modos de funcionamento (por exemplo, modo leitura ou modo *sleep*), fazendo com que estes dispositivos possam ser capazes de ser alimentados por uma bateria. Quanto mais reduzida for a potência destes modos mais o sensor se adequa a aplicações *low-power*, que pretendam a maior duração da bateria sem detrimento de dados de informação relevantes.

- **Eixos**

O número de eixos descrito num acelerómetro descreve as direções em que o dispositivo consegue medir acelerações. Na maioria dos casos, um acelerómetro de 3 eixos consegue satisfazer todas as exigências já que possibilita compreender a resposta do sistema no espaço tridimensional.

Para satisfazer as exigências de baixa potência e de baixo consumo, a melhor opção passa por um sensor MEMS capacitivo que seja capaz de satisfazer as especificações enumeradas.

2.2. Comunicação

Nos próximos anos espera-se que milhares de milhões de dispositivos possam estar ligados através de comunicações rádio. Com o rápido crescimento da Internet das Coisas, em inglês *Internet of Things* (IoT), as tecnologias de comunicação de longas distâncias, juntamente com a baixa potência, tornam cada vez mais popular as *low power wide area networks* (LPWANs).

A IoT refere-se à comunicação e à troca de dados entre dispositivos e sensores sendo que, cada vez mais, estas tecnologias estão a ser implementadas nos mercados mais quotidianos (segurança, trânsito, agricultura, cidades inteligentes, entre outros). Estas aplicações possuem, no entanto, algumas especificações bastante próprias: longas distâncias, baixo fluxo de dados, baixo consumo energético e efetividade de custo (baixo custo de produção e manutenção). As tecnologias existentes de curta distância, como ZigBee e Bluetooth, não estão adaptadas para cenários de longas transmissões, e as soluções baseadas em comunicações móveis, caso do 3G e 4G, apresentam um consumo energético demasiado excessivo para estas aplicações. Por tudo isto, as aplicações de IoT, requerem uma nova tecnologia de comunicação sem fios (*wireless*): LPWAN. A figura 3 apresenta a distribuição destas três áreas de comunicação.

Este tipo de rede está a ganhar cada vez mais popularidade devido à sua baixa potência, comunicações de baixo custo e longo alcance, podendo atingir 10 a 40 km, em zonas rurais, e 1 a 5 km, em zonas urbanas. Possui ainda uma grande eficiência energética e materiais de baixo custo.

O termo “LPWAN” só começou a ser utilizado em 2013 e, desde então, muitas tecnologias foram surgindo nas bandas de frequências licenciadas e não licenciadas, sendo que as de maior notoriedade são as seguintes: Sigfox, LoRa/LoRaWAN e NB-IoT [15].

A tecnologia Sigfox foi desenvolvida, em 2010, pela empresa Sigfox, estando representado no mesmo nome, a empresa e o operador de rede LPWAN. Esta rede opera e comercializa as suas próprias soluções de IoT em 63 países e com várias parcerias internacionais, em termos de operadores de rede [16].

No ano de 2009 inaugurou-se a tecnologia LoRa, a cargo da empresa Cycleo. Três

anos mais tarde, esta viria a ser comprada pela empresa Semtech, atualmente detentora da tecnologia. Em 2015, foram estabelecidos os padrões gerais para o LoRaWAN, pelo grupo LoRa-Alliance, estando implementado em 142 países e em crescimento [17].

O NB-IoT é uma tecnologia baseada em banda estreita (*narrow band technology*) e é padronizada pelo projeto de parceria da 3ª geração (3GPP). As especificações foram publicadas em 2016 e conta, atualmente, com 142 redes globalmente distribuídas por 114 operadores de rede [18].

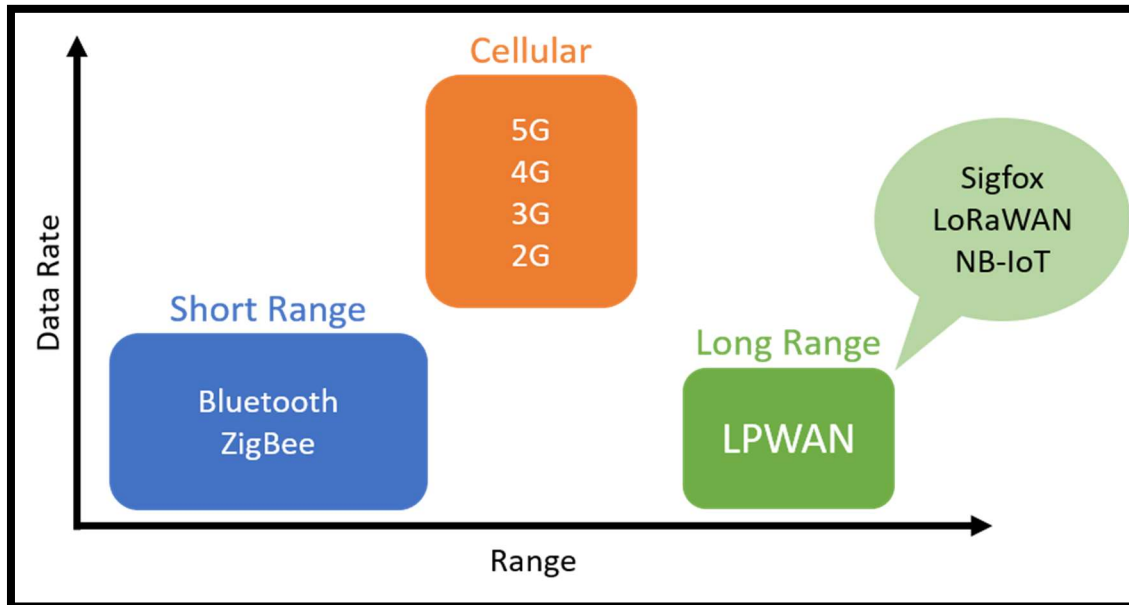


Figura 3 – Comparação das tecnologias de comunicação

Todas estas tecnologias podem ser usadas neste projeto sendo, por isso, necessário fazer um estudo de vários fatores para selecionar a que mais se adequa. Esses fatores são: qualidade de serviço (*quality of service*, QoS), cobertura, alcance, latência, bateria, escalabilidade, comprimento do pacote de informação (*payload*), instalação e custo.

2.2.1. Sigfox

Este operador de rede LPWAN oferece uma solução de conectividade de IoT ponto-a-ponto. Depois de instaladas as estações base proprietárias, com o devido *software*, é efetuada a ligação aos servidores através de uma rede baseada em IP. Os dispositivos finais (*end devices*, ED) são ligados às estações base através da modulação *differential binary phase-shift keying* (D-BPSK), numa banda ultra estreita (*ultra-narrow band*) de 100 Hz, na banda portadora de sub-GHz (bandas ISM, *Industrial, Scientific and Medical*). Esta tecnologia usa as bandas ISM não licenciadas, ou seja, 868 MHz na Europa, 915 MHz na América e 433 MHz na Ásia. Através da banda ultra estreita, é possível usar a largura de banda de um modo mais eficiente e obter níveis baixos de ruído. Assim, consegue-se um

baixo consumo energético, uma alta sensibilidade no recetor e a possibilidade de ter antenas, de baixo custo, embora apenas apresentem um máximo de receção de 100 bps, ou 600 bps, dependendo da região.

Numa primeira fase, apenas estava suportada a comunicação *uplink*, mas com a evolução da rede, passou a ser bidirecional e com uma assimetria de ligação significativa. O número de mensagens, através de *uplink*, está limitado a 140 por dia, sendo que o tamanho máximo do *payload*, para cada mensagem de *uplink*, é de 12 bytes. No entanto, o número de mensagens de *downlink* está limitado a 4 por dia, o que significa que o reconhecimento de cada mensagem de *uplink* não é suportado. O tamanho máximo do *payload*, para cada mensagem de *downlink*, é de 8 bytes. Sem poder contar com este suporte de conhecimento das mensagens, a confiança na comunicação de *uplink* fica a cargo da diversidade no tempo e em frequência, bem como na duplicação das transmissões. Cada mensagem de um ED é transmitida várias vezes (3 por defeito) e em diferentes canais de frequência. Na Europa, a banda entre 868.180 MHz e 868.220 MHz é dividida em 400 canais ortogonais de 100 Hz, sendo que 40 desses canais encontram-se reservados. Como as estações base suportam a receções de várias mensagens em simultâneo, cabe ao ED a escolha aleatória das frequências em que pretende transmitir as mensagens, simplificando assim o seu design, e reduzindo o respetivo custo [15] [19].

2.2.2. LoRa/LoRaWAN

O LoRa representa uma camada física capaz de modular o sinal através da técnica proprietária de dispersão de espectro (*spread spectrum*), na banda de ISM (sub-GHz). Tal como a tecnologia anterior, também utiliza as bandas não licenciadas de ISM, ou seja, 868 MHz na Europa, 915 MHz na América e 433 MHz na Ásia. A comunicação bidirecional é possível através da modulação de *chirp spread spectrum* (CSS), que espalha o sinal de banda estreita numa largura de banda do canal mais larga. O sinal resultante apresenta baixos níveis de ruído, permitindo uma maior resiliência às interferências.

Esta tecnologia utiliza 6 fatores de dispersão (SF7 até SF12), em inglês *spreading factors* (SFs), para adaptar o nível de dados à distância pretendida. Um SF elevado permite distâncias mais longas com uma baixa taxa de dados, e vice-versa, ou seja, um SF mais reduzido favorece distâncias mais curtas, mas que necessitem de uma maior taxa de dados. A taxa de dados do LoRa tem um intervalo entre 300 bps e 50 kbps, dependendo do *spreading factor* e da largura de banda do canal. Além disso, as mensagens transmitidas com diferentes SFs podem ser recebidas, em simultâneo, pelas estações base de LoRa, também conhecidas como *gateways*. O tamanho máximo do *payload* de cada mensagem é de 243 bytes. Um protocolo de comunicação, baseado em LoRa, foi criado pelo grupo LoRa-Alliance e denominado de LoRaWAN.

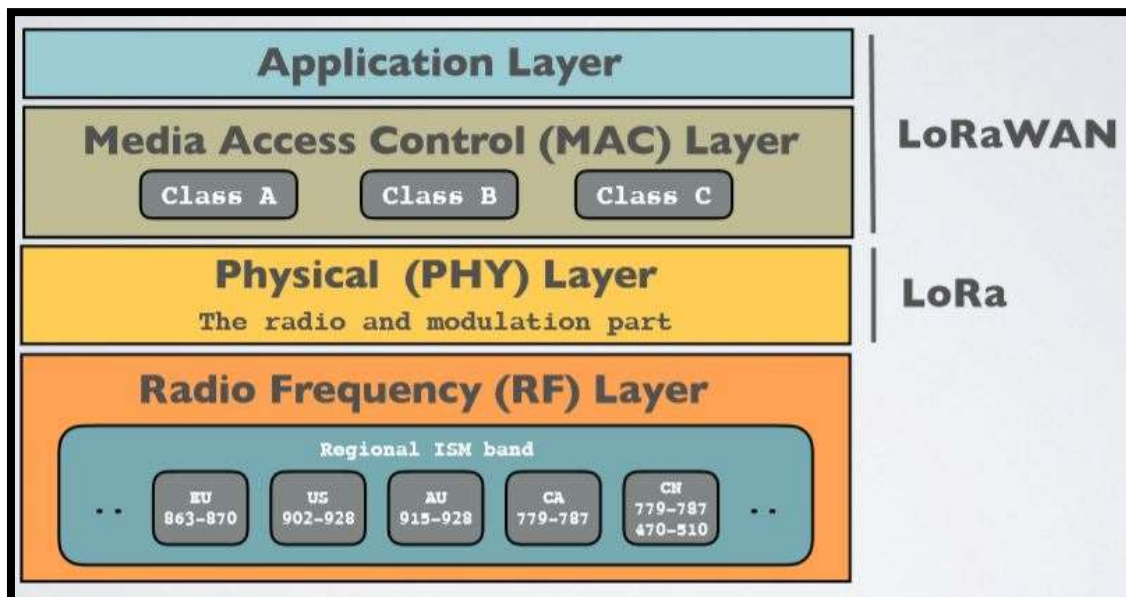


Figura 4 – *Stack* de protocolo da tecnologia LoRa/LoRaWAN [20]

Como se pode visualizar na figura 4, o LoRa representa a camada física, ou a modulação *wireless* utilizada, para criar as comunicações de longas distâncias. O LoRaWAN define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema da rede.

Ao utilizar este protocolo, cada mensagem transmitida por um ED é recebida por todas as *gateways* que estão ao alcance do dispositivo. Ao explorar esta recepção redundante, o LoRaWAN melhora a taxa de mensagens recebidas, embora sejam necessárias várias *gateways* para obter estes resultados, o que implica maiores custos de implementação. Os resultados da duplicação de mensagens são filtrados pelo servidor da rede, igualmente responsável pelas verificações de segurança, enviando a confirmação da recepção aos EDs e a mensagem correspondente ao servidor da aplicação. Além disso, as múltiplas recepções de mensagens, por parte de diferentes *gateways*, ajudam na localização dos EDs. Para este caso, a técnica de tempo diferenciado de chegada (*time difference of arrival*, TDOA) é utilizada para obter tempos precisos de sincronização entre múltiplas *gateways* [15].

Para estabelecer uma arquitetura de longo alcance (figura 5) é necessária uma topologia em estrela (*star topology*), preservando assim os consumos energéticos ao mesmo tempo que se estabelecem comunicações mais longas [21].

As terminologias da arquitetura são as seguintes: ED (dispositivo de comunicação de baixa potência), *gateway* (conjunto de dispositivos com antenas que recebem informação dos EDs e que podem também enviar informação de volta), servidor de rede (servidores que encaminham as mensagens dos EDs para a respetiva aplicação, e vice-versa), aplicação (*software* a correr no servidor da aplicação).

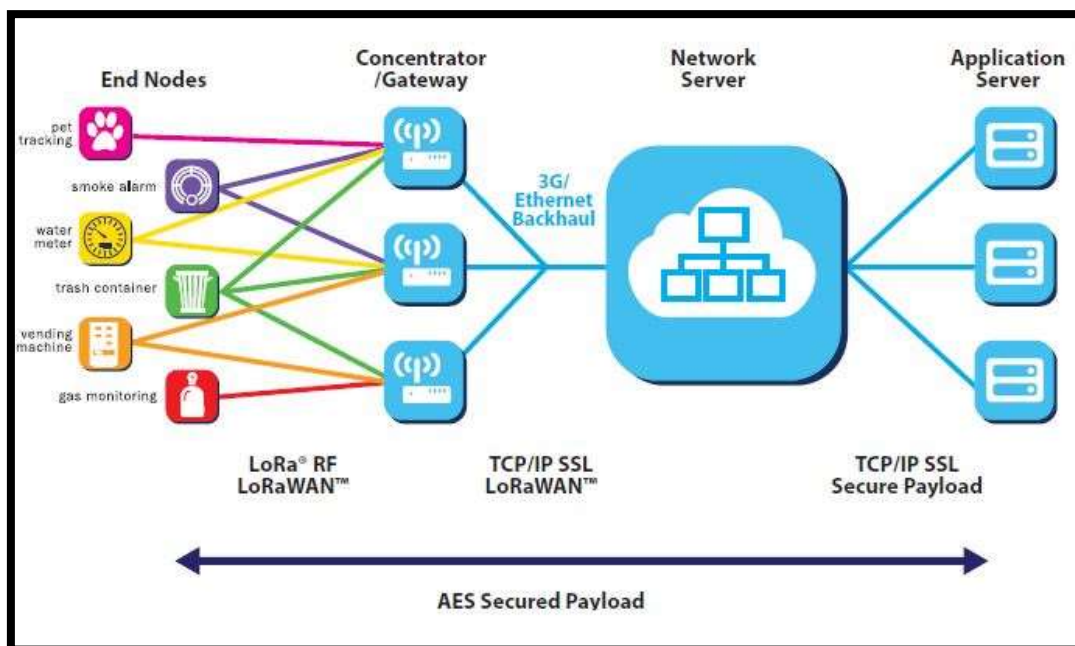


Figura 5 – Arquitetura do LoRa/LoRaWAN [21]

Adicionalmente, o LoRaWAN disponibiliza várias classes de dispositivos finais para endereçar os diferentes requisitos das aplicações de IoT (alcance, latência, entre outros) [15].

- **Classe A (ED bidirecional):** um dispositivo desta classe permite comunicações bidirecionais, onde cada transmissão de *uplink* é seguida de dois intervalos de recepção da mensagem de *downlink*. O conjunto de transmissões enviado pelo dispositivo é baseado nas próprias necessidades de comunicação, com uma pequena variação relacionada com tempos aleatórios. Por estes motivos, este tipo de sistema é o que requer menor potência, para aplicações que apenas necessitem de uma pequena comunicação de retorno. As mensagens de *downlink* que apareçam fora dos intervalos apenas serão ouvidas na próxima mensagem de *uplink*. O modo de funcionamento desta classe está descrito na figura 6.

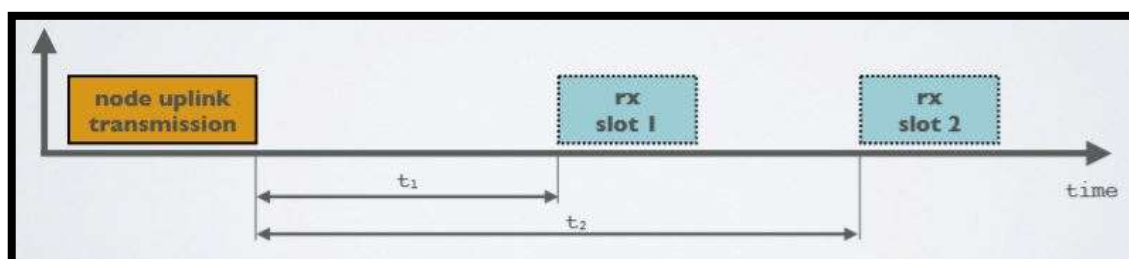


Figura 6 – Modo de funcionamento de uma classe A [20]

- **Classe B (ED com intervalos programados de recepção):** este dispositivo, além de possuir toda a estrutura de uma classe A, apresenta intervalos

programados adicionais para a recepção de mensagens de *downlink*. Para abrir estas janelas de recepção, os dispositivos recebem um sinalizador de tempo sincronizado (*beacon*), da *gateway*. Esta ação permite ao servidor da rede ter conhecimento dos intervalos em que o dispositivo está preparado para receber a mensagem de *downlink*. O modo de funcionamento desta classe está descrito na figura 7.

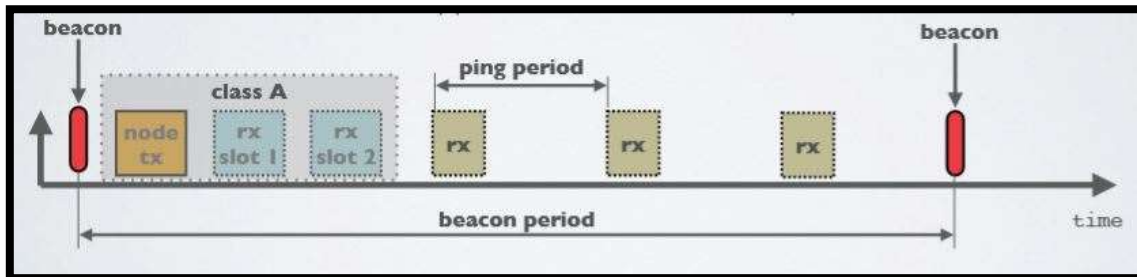


Figura 7 – Modo de funcionamento de uma classe B [20]

- **Classe C (ED com intervalo máximo de recepção):** este dispositivo, possui também a estrutura de uma classe A, mas apresenta, adicionalmente, uma janela de recepção contínua, e apenas fecha este intervalo no próximo pedido de uma mensagem de *uplink*, ou de forma deliberada, para minimizar os consumos energéticos. O modo de funcionamento desta classe está descrito na figura 8.



Figura 8 – Modo de funcionamento de uma classe C [20]

2.2.3. NB-IoT

Esta tecnologia representa uma inovação de IoT em banda estreita (*narrow band*), apresentada pelo grupo 3GPP em junho de 2016. O NB-IoT consegue coexistir com o sistema global para comunicações móveis (em inglês, *Global System for Mobile communication*, GSM) e com o *Long-Term Evolution* (LTE), dentro das bandas de frequência licenciadas (700 MHz, 800 MHz e 900 MHz). Neste caso, o NB-IoT ocupa uma largura de banda de 200 kHz, que corresponde a um bloco de recurso na transmissão de GSM e LTE. Com esta seleção de frequência, as seguintes operações tornam-se elegíveis para serem executadas [15]:

- **Operação *stand-alone*:** um possível cenário de utilização das frequências de GSM usadas atualmente;
- **Operação *guard-band*:** passa por utilizar os blocos de frequências que se encontram sem uso, dentro da portadora de guarda do LTE;
- **Operação *in-band*:** utiliza os blocos de recurso dentro da portadora do LTE.

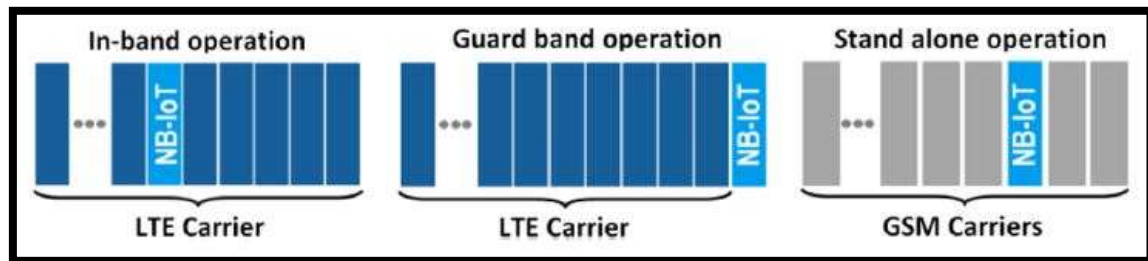


Figura 9 – Diferentes operações do NB-IoT [15]

Para o modo *stand-alone*, a portadora de GSM encontra-se como demonstra a figura 9, no entanto, o grupo 3GPP recomenda a integração do NB-IoT em conjunto com as redes móveis do LTE, embora apenas possa ser suportado com alguns melhoramentos da infraestrutura existente.

O protocolo de comunicação é baseado no protocolo do LTE, reduzindo algumas funcionalidades deste para um mínimo e melhorando aquelas que são necessárias às aplicações de IoT. Por exemplo, o sistema de *back-end* do LTE é usado para passar informação em *broadcast*, válida para todos os dispositivos dentro de uma célula. Este sistema, ao obter recursos e informações sobre os consumos energéticos de todos os dispositivos, mantém-se num estado mínimo, tanto a nível de tamanho como a nível de ocorrências. Fica assim otimizado para interpretar mensagens pequenas e pouco frequentes, evitando funções desnecessárias ao conceito de IoT (medição da qualidade do canal, agregação da portadora e dupla conectividade são algumas das funções dispensáveis). Com tudo isto em perspectiva, os EDs conseguem reduzir os tamanhos das suas baterias, tornando-os mais eficientes a nível de custo.

Consequentemente, o NB-IoT pode ser interpretado como uma nova interface aérea, do ponto de vista da *stack* de protocolo, enquanto continua a ser construído na infraestrutura estável do LTE. Permite assim ligações até 100 mil aparelhos, por célula, com grande potencial para elevar esta capacidade, por meio de um aumento do número das portadoras. O NB-IoT utiliza uma divisão de frequência de uma única portadora com múltiplos acessos (FDMA), nas mensagens de *uplink*, e a versão ortogonal (OFDMA), nas mensagens de *downlink*, com uma modulação de fase em quadratura (QPSK). A taxa de dados está limitada a 200 kbps, para o *downlink*, e a 20 kbps, para o *uplink*. O tamanho máximo do *payload*, de cada mensagem, é de 1600 bytes e esta tecnologia tem potencial para conseguir prolongar a vida de uma bateria até 10 anos, com uma transmissão média

diária de 200 bytes [15].

Ao longo dos anos, o NB-IoT tem vindo a ser melhorado pelo grupo 3GPP, apontando várias novas funcionalidades como: métodos de localização, serviços de múltiplas transmissões e mobilidade.

2.2.4. Comparação dos Principais Fatores de IoT

Muitos fatores podem ser tidos em consideração quando é preciso selecionar uma tecnologia de LPWAN apropriada à aplicação de IoT desejada. Estes são os principais: qualidade de serviço, vida da bateria, latência, escalabilidade, tamanho da mensagem, cobertura, alcance, implementação e custo. Nos próximos pontos serão comparados estes termos para as comunicações LPWAN selecionadas [15].

- **Qualidade de Serviço**

As tecnologias de Sigfox e LoRa utilizam protocolos de comunicação assíncronos e num espectro sem licença, podendo evitar interferências, *multipath* e *fading*. No entanto, não podem oferecer a mesma qualidade providenciada pelo NB-IoT. Esta tecnologia utiliza um espectro licenciado e um protocolo síncrono baseado em LTE, o que se revela uma grande vantagem para a qualidade do serviço, mas com um preço a pagar (espectro do LTE possui leilões de milhões de euros por MHz). Na relação qualidade/custo, o NB-IoT é a melhor opção para aplicações que necessitem de um serviço de qualidade garantido, sendo que as aplicações que não necessitem tanto desta característica podem optar por LoRa ou Sigfox.

- **Bateria e Latência**

Em todas as comunicações LPWAN abordadas, os EDs estão em modo *sleep* na maioria do tempo, o que resulta numa grande poupança de energia, prolongando assim a vida da bateria. No entanto, com o NB-IoT, estes dispositivos tendem a ter maiores consumos devido às comunicações síncronas e aos modos de acessos do OFDMA/FDMA, que requerem mais corrente. Estas funcionalidades aumentam os custos energéticos no NB-IoT em comparação com o Sigfox e LoRa. No entanto, o NB-IoT consegue oferecer uma vantagem em comparação com os outros tipos de comunicação: baixa latência. Ao contrário do Sigfox, o LoRa oferece uma classe C para manusear uma baixa latência bidirecional, consumindo mais energia. Por isso, para aplicações que não sejam sensíveis à latência e que não tenham de enviar grandes quantidades de informação, o Sigfox e a classe A do LoRa são as melhores opções. Para aplicações com baixa latência, a escolha deve passar pelo NB-IoT ou pela classe C do LoRa.

- **Escalabilidade e Tamanho do *Payload***

O suporte de um grande número de dispositivos é uma das características base destas três tecnologias, trabalhando satisfatoriamente em sistemas com uma grande densidade de aparelhos ligados. Várias técnicas são consideradas para poder dar resposta a esta funcionalidade, tal como a exploração eficiente da diversidade do canal, tanto no tempo como no espaço. No entanto, o NB-IoT oferece ainda uma maior escalabilidade, permitindo ligações até 100 mil dispositivos finais, por célula, comparado com os 50 mil do Sigfox e do LoRa. Também em termos do tamanho do *payload*, o NB-IoT consegue suportar as maiores dimensões, podendo transmitir até 1600 bytes. Enquanto isto, o LoRa consegue enviar um máximo de 243 bytes por *payload*, enquanto que o Sigfox apenas consegue um tamanho de 12 bytes, limitando assim as aplicações que necessitem de enviar quantidades consideráveis de informação.

- **Cobertura da Rede e Alcance**

A maior vantagem da utilização do Sigfox está relacionada com o seu alcance, visto que uma estação base consegue abranger uma cidade completa (possível alcance de mais de 40 km). Com um alcance mais diminuto, o LoRa consegue ainda abranger zonas até 20 km, sendo que o NB-IoT apresenta os piores valores em termos de cobertura e alcance, não indo além dos 10 km. Adicionalmente, o NB-IoT está limitado pelas estações base do LTE, não sendo aconselhável para regiões rurais que tenham uma fraca cobertura deste tipo de comunicação.

- **Modelo de Implementação**

As especificações do NB-IoT foram anunciadas em junho de 2016, sendo que foi necessário mais algum tempo até que a rede estivesse estabelecida. Por outro lado, os sistemas de Sigfox e LoRa estão mais refinados e já sob comercialização em vários países. Neste momento, o LoRa está presente em 142 países e o Sigfox está distribuído em 63 países, sendo que ainda estão a decorrer grandes avanços para poder chegar a cada vez mais países e regiões [16] [17]. Uma das vantagens mais significativa do LoRa está na sua flexibilidade. Ao contrário do Sigfox e do NB-IoT, o LoRa oferece a possibilidade de estabelecer uma rede local, isto é, uma *local area network* (LAN), que utiliza uma *gateway*, podendo também servir para se ligar a uma rede pública através de uma estação base. No campo industrial, um modelo de operação híbrido pode ser utilizado para cobrir algumas áreas com uma rede local de LoRa e uma rede pública de LoRaWAN para as zonas exteriores a estas áreas.

- **Custo**

Vários aspetos têm de ser considerados em termos de custo, tais como o custo do espetro (licença), o custo da rede e da sua implementação e, por último, o custo de cada dispositivo. Na tabela 2 vem uma aproximação relacionada com os custos médios de cada aspeto, para todas as tecnologias. O Sigfox e o LoRa apresentam-se com um custo mais eficiente, quando comparados com o NB-IoT.

Tecnologia	Espectro	Implementação	Dispositivos
Sigfox	Gratuito	>4000 € / estação base	<2 €
LoRa	Gratuito	>100 € / gateway >1000 € / estação base	3 a 5 €
NB-IoT	>500 M€/MHz	>15000 € / estação base	>20 €

Tabela 2 – Comparação de custos das tecnologias de LPWAN [15]

Tendo em conta todas as características analisadas é possível elaborar um gráfico de fatores, como o da figura 10, e uma tabela capaz de comparar os aspetos gerais das tecnologias LPWAN (tabela 3).

Para este projeto *low-cost* a melhor opção será a tecnologia LoRa já que será necessário transmitir a longas distâncias, com uma taxa de dados pequena, implementando uma rede de custo reduzido.

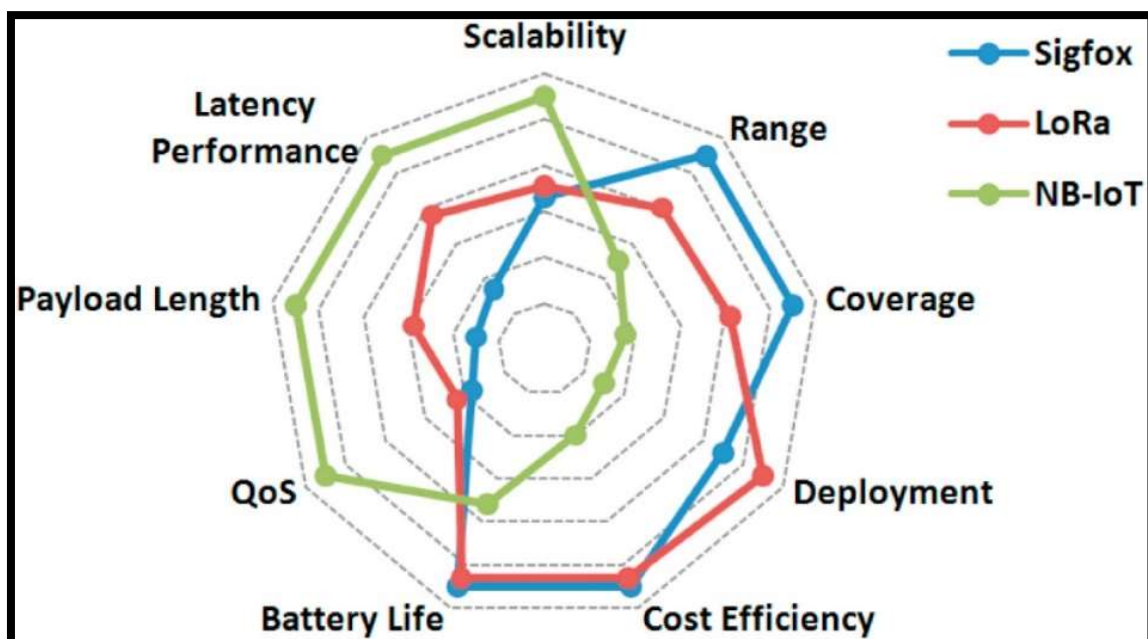


Figura 10 – Comparação dos fatores de IoT nas principais tecnologias de LPWAN [15]

Caraterísticas	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulação	D-BPSK	CSS	QPSK
Frequência	Bandas ISM (868 MHz na Europa)	Bandas ISM (868 MHz na Europa)	Bandas LTE
Largura de banda	100 Hz	250 kHz e 125 kHz	200 kHz
Taxa de dados máxima	100 bps ou 600 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirecional	Limitado / <i>Half-duplex</i>	Sim / <i>Half-duplex</i>	Sim / <i>Half-duplex</i>
Nº máximo de mensagens/dia	140 (<i>uplink</i>), 4 (<i>downlink</i>)	Ilimitado / Políticas de uso (ex: TTN)	Ilimitado
Tamanho máximo do <i>payload</i>	12 bytes (<i>uplink</i>), 8 bytes (<i>downlink</i>)	243 bytes	1600 bytes
Alcance	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Imunidade a interferências	Muito alta	Muito alta	Baixa
Autenticação e encriptação	Não suportado	Sim (AES 128b)	Sim (Encriptação LTE)
Taxa de dados adaptável	Não	Sim	Não
Rede privada	Não	Sim	Não
<i>Standard</i>	Sigfox	LoRa-Alliance	3GPP

Tabela 3 – Resumo das caraterísticas principais das tecnologias de LPWAN [15]

3. Arquitetura do Projeto

Neste capítulo será descrita a arquitetura global do projeto bem como as especificações e requisitos do sistema.

Os sistemas de transporte inteligente (em inglês *Intelligent Transport Systems*, ITS) integram aplicações avançadas que pretendem proporcionar serviços inovadores relacionados com diferentes tipos de transporte, com o objetivo de tornar todas as redes de transporte mais seguras e mais coordenadas, no fundo, mais “inteligentes”.

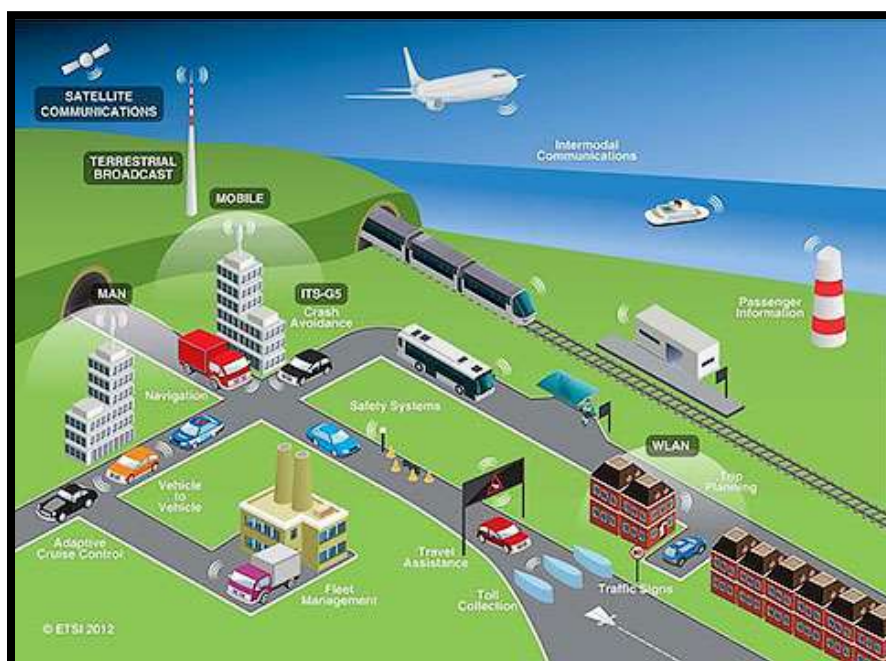


Figura 11 – Esquema global dos sistemas de transporte inteligente (ITS) [22]

Os ITS incluem telemática e todo o tipo de comunicações de veículos, incluindo a relação veículo-veículo e também a relação veículo-infraestrutura. Este serviço não é

exclusivo dos transportes rodoviários, podendo também ser incluído nos transportes ferroviários, marítimos e aéreos. Com o desenvolvimento de diversos produtos, as aplicações ITS tornam-se uma parte integrante dos sistemas de transporte. Tal como mostra a figura 11, os sistemas de segurança fazem parte deste sistema global.

Em Portugal, a lei (nº 32/2013) reconhece a implementação e a utilização de sistemas de transportes inteligentes na fração rodoviária. Na Europa, as entidades responsáveis por estas aplicações agrupam-se numa rede denominada por “ERTICO – ITS Europe” [22].

3.1. Rede de Sensores Sem Fios

Uma rede de sensores sem fios (*wireless sensor network*, WSN) é composta por centenas de pequenos nós de baixo custo e com limitações de memória, energia e capacidade de processamento. Vários avanços tecnológicos nas comunicações *wireless* permitem a implementação de sistemas de baixo custo, baixa potência e com sensores multifuncionais de dimensões reduzidas e com longas comunicações.

As WSNs podem ser definidas como autonomamente configuráveis, e sem a complexidade de uma infraestrutura fixa, capazes de monitorizar propriedades físicas ou ambientais, tais como temperatura, som, vibração, movimento, pressão, entre outras. Conseguem passar os seus dados, através da rede, para um local de recolha de informação onde os dados possam ser analisados. Uma estação base (*gateway*) atua com uma interface entre o utilizador e a rede. Tipicamente, uma rede de sensores *wireless* consegue abranger um grande número de nós (*nodes*) de sensores. Um nó de sensor pode ser equipado com dispositivos de sensorização (geralmente MEMS) e computação (*Central Processing Unit*, CPU), *transceivers* de rádio e componentes de potência. No entanto, estes apresentam uma grande restrição de recursos: velocidade de processamento limitada, capacidade de armazenamento reduzida e pouca largura de banda para comunicação. Após a instalação, os sensores podem começar a adquirir dados da propriedade física em causa. Este tipo de sensor *wireless* pode também ser inquirido pela *gateway*, ou pela aplicação, para executar instruções específicas ou realizar uma recolha de dados. O modo de funcionamento dos sensores pode ser contínuo ou orientado a eventos. O sistema de posicionamento global (*global positioning system*, GPS), em conjunto com alguns algoritmos de posicionamento local, podem obter informações de localização ou posicionamento dos dispositivos.

As WSNs permitem que novas aplicações consigam pactuar com as restrições dos protocolos. Devido à exigência de baixa complexidade do dispositivo, juntamente com o baixo consumo de energia, um equilíbrio adequado entre as capacidades de comunicação e o processamento dos sinais/dados deve ser estabelecido. Esta procura motivou grandes esforços nas atividades de pesquisa, na criação de padrões e nos investimentos industriais proporcionados nas duas últimas décadas [23].

As vantagens desta rede são as seguintes: configurações de rede sem infraestrutura

fixa, adequado para localizações mais remotas, flexibilidade, implementação de baixo custo, sistema sem fios, fácil ligação de novos dispositivos na rede, acessibilidade através de uma unidade centralizada, entre outros.

No entanto, possui também algumas desvantagens: menor segurança devido a exposição dos equipamentos, velocidades mais reduzidas, configurações mais extensas, perturbações do meio externo [24].

3.1.1. Desafios das WSNs

Existem muitos desafios ligados à implementação de WSNs, sendo o principal o consumo energético. De modo a maximizar a vida da bateria, toda a rede deve ter como objetivo a máxima eficiência energética. No entanto, outros desafios são impostos [23]:

- **Tolerância a Falhas:** os sensores são vulneráveis e frequentemente implementados em ambientes perigosos. Os nós podem falhar devido a problemas de *hardware* (danos físicos) ou por falta de energia. Por este motivo, é expectável que as falhas sejam muito superiores comparativamente a uma rede conectada por fios a uma infraestrutura. O protocolo da rede de sensores deve ser capaz de detetar estas falhas, o mais rápido possível, e ser robusto a ponto de conseguir lidar com um número relativamente grande de falhas, mantendo a funcionalidade geral da rede. Isto tem especial importância no protocolo de encaminhamento de mensagens, sendo que deve garantir que existem caminhos alternativos para redirecionar os pacotes. Diferentes ambientes de implementação apresentam diferentes requisitos de tolerância a falhas.
- **Escalabilidade:** as redes de sensores variam entre alguns dispositivos até centenas de milhares deles. Além disso, a densidade de implementação também é variável. Por exemplo, para receber dados de alta resolução, a densidade de dispositivos podem atingir níveis em que um nó possui milhares de vizinhos no alcance da transmissão. Os protocolos das redes precisam de uma escala adequada consoante a aplicação desenvolvida, garantindo um desempenho adequado.
- **Custos de Produção:** muitos modelos de implementação consideram os nós de sensores como dispositivos descartáveis, sendo que as redes destes sensores apenas podem competir com uma recolha de informação apropriada caso os dispositivos individuais, que podem chegar a muitos milhares de unidades, possam ser produzidos a baixo custo.

- **Restrições de *Hardware*:** no mínimo, todos os nós precisam de uma unidade de sensorização (um sensor), uma unidade de processamento, uma unidade de transmissão e uma fonte de alimentação. Opcionalmente, estes nós podem já ter sensores embutidos ou outros dispositivos adicionais, como sistemas de localização. No entanto, estas funcionalidades adicionais representam um maior consumo energético e um aumento do tamanho físico do dispositivo, pelo que devem apenas ser inseridas de uma forma equilibrada.
- **Topologia da Rede:** embora as WSNs tenham evoluído em muitos aspetos, continuam a ser redes com recursos limitados em termos de energia, poder computacional, memória e capacidade de comunicação. A manutenção da topologia é uma das questões mais importantes no que toca à redução do consumo energético nas WSNs.
- **Consumo Energético:** este é o principal desafio das WSNs. A começar pelo tamanho dos nós, que limita o tamanho da própria bateria, o design de *software* e *hardware* precisa de considerar todas as possíveis falhas de eficiência energética. Por exemplo, a compactação dos dados pode reduzir a quantidade de energia usada na transmissão, mas pode até ser necessária mais energia nessa computação, pelo que não se apresenta como uma solução viável. O modo como as aplicações gerem os respetivos nós influencia igualmente o desempenho energético: algumas podem desligar um subconjunto de nós sem comprometer a restante rede, enquanto outras precisam de todos os dispositivos em simultâneo.

3.1.2. Estrutura das WSNs

A estrutura de uma WSN inclui diferentes topologias para redes de comunicação rádio. As principais topologias serão descritas abaixo [23].

- **Topologia Estrela (*Star*)**

Uma rede em estrela representa uma topologia de comunicação em que uma única estação base (*gateway*) é capaz de enviar/receber uma mensagem de vários nós remotos, sendo que estes nós não têm permissões para enviar mensagens de uns para os outros. As vantagens deste tipo de rede incluem aspetos como a simplicidade e a capacidade de reduzir o consumo energético nos nós. A desvantagem é que a *gateway* precisa de estar situada dentro do alcance de transmissão de todos os nós pelos quais é responsável, não sendo tão robusta como outras redes, pois depende de uma

gateway para fornecer os dados de diversos nós que não podem ser acedidos de outra forma.

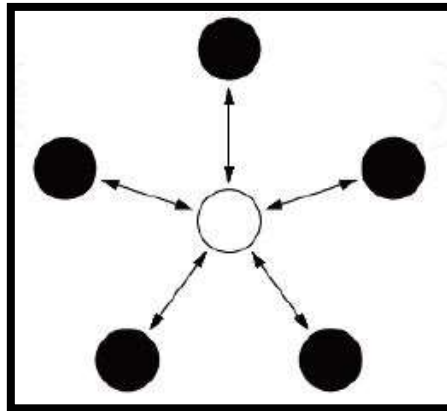


Figura 12 – Topologia estrela (*star*) [23]

- **Topologia em Malha (*Mesh*)**

Uma rede em malha permite transmitir dados de um nó para outro que esteja no seu alcance, dentro da rede. Isto permite comunicações *multi-hop*, ou seja, se um nó pretende enviar uma mensagem para outro que esteja fora do alcance, pode utilizar um nó intermediário para encaminhar a respetiva mensagem. Esta topologia tem a vantagem de redundância e escalabilidade, pois se um nó individual falhar, outro nó consegue avançar com a mensagem para o destino desejado. Além disso, o alcance da rede não é necessariamente limitado pelo intervalo entre os nós individuais, mas pode ser estendido por mais nós adicionais do sistema. A desvantagem passa por um maior consumo de energia dos nós que implementam as comunicações *multi-hop*, limitando a vida da bateria. Por outro lado, e à medida que o número de saltos nestas comunicações aumenta, o tempo de entrega de mensagem também aumenta, especialmente em sistemas de baixa potência.

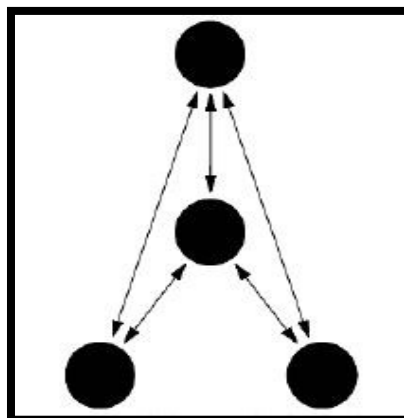


Figura 13 – Topologia em malha (*mesh*) [23]

- **Topologia Híbrida (*Hybrid*)**

Uma mistura das topologias de estrela e em malha permite uma rede mais robusta e versátil, mantendo um baixo consumo energético dos nós. Nesta topologia, os nós com menor capacidade energética não conseguem encaminhar as mensagens, permitindo manter o consumo energético em valores mínimos. Os restantes nós da rede, as *gateways*, têm a capacidade de comunicações *multi-hop*, o que permite encaminhar as mensagens dos nós de baixa potência para o destino selecionado. Como as *gateways* necessitam de mais energia, costumam ter fontes de alimentação maiores, ou podem mesmo estar ligadas à rede elétrica.

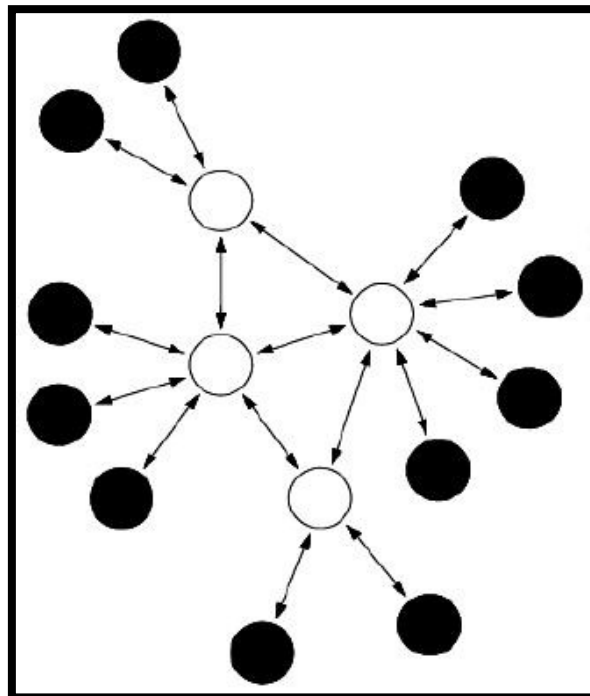


Figura 14 – Topologia híbrida (*hybrid*) [23]

3.1.3. Estrutura de um Nó de Sensor

Um nó de sensor é composto por 4 componentes: unidade do sensor (MEMS), unidade de processamento (CPU), unidade de comunicação (*transceiver*) e fonte de alimentação. Pode ainda conter componentes adicionais específicos à aplicação implementada.

Um esquema destes componentes está descrito na figura 15, bem como as ligações de cada um deles.

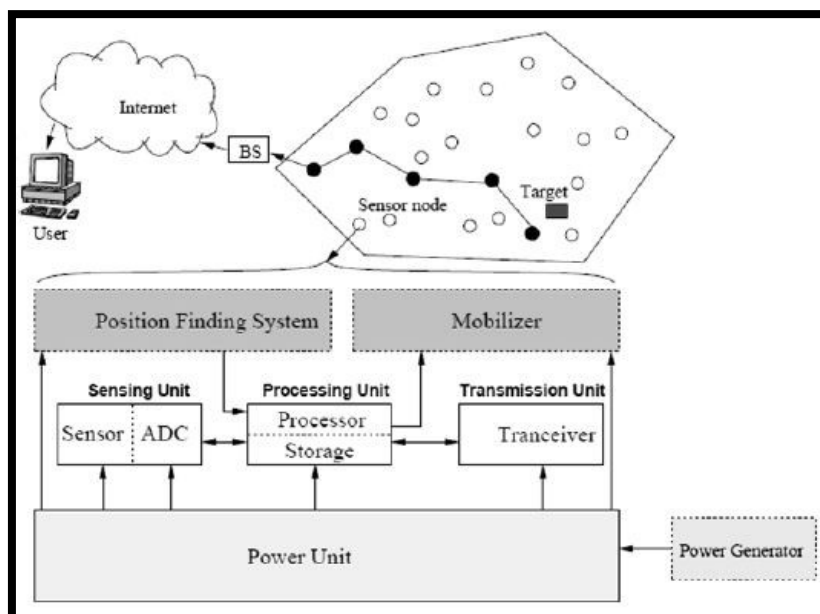


Figura 15 – Componentes de um nó de sensor [23]

A unidade do sensor pode ser composta por duas subunidades: sensor e conversor analógico-digital (ADC). Os sinais analógicos, produzidos pelo sensor, são convertidos em sinais digitais pelo ADC e depois enviados para a unidade de processamento. Esta unidade pode, ou não, estar associada a uma pequena unidade de armazenamento que consegue gerir vários procedimentos que fazem com que o nó consiga colaborar com outros nós para executar as tarefas atribuídas. A unidade de transmissão liga o nó à rede, através de um protocolo de comunicação estabelecido. A fonte de alimentação, unidade que faz as restantes funcionarem, pode ser suportada por vários tipos de baterias (pilhas, por exemplo) ou até células de energia solar, podendo ter ainda métodos de poupança de energia associados.

Cada um dos nós de sensores tem a capacidade de adquirir dados e enviá-los para a *gateway*, sendo que esta deve reencaminhá-los para o utilizador. A *stack* de protocolo usada pelos nós está representada na figura 16. Esta combina o conhecimento dos consumos energéticos com os caminhos de envio de mensagens, integra os dados com os protocolos da rede, suporta comunicação *wireless* de baixo consumo energético e promove a cooperação entre os nós de sensores. A *stack* consiste nas seguintes camadas: aplicação, transporte, rede, ligação de dados e física. Tem ainda os seguintes planos: gestão de energia, gestão de mobilidade e gestão de tarefas. Diferentes tipos de *software* de aplicação podem ser construídos e usados na camada de aplicação, dependendo das tarefas de sensorização. Esta camada torna o *hardware* e o *software*, da camada mais baixa, transparentes ao utilizador final. A camada de transporte ajuda a manter o fluxo de dados, caso seja requerido pela aplicação. A camada de rede trata do encaminhamento dos dados fornecidos pelo transporte e especifica possíveis caminhos de *multi-hop* que possam ser usados entre o sensor e a *gateway*. A camada de ligação de dados é responsável pela multiplexagem dos fluxos de dados, pela deteção de *frames*, pelo *media access control* (MAC) e pelo controlo de erros. A camada física atende às necessidades de modulação,

seleção de frequência, encriptação de dados e técnicas de receção e envio de mensagens. Além disso, os planos de gestão de energia, mobilidade e tarefas monitorizam os consumos energéticos, os movimentos e a distribuição de tarefas entre os nós, coordenando as tarefas de sensorização e diminuindo os consumos [23].

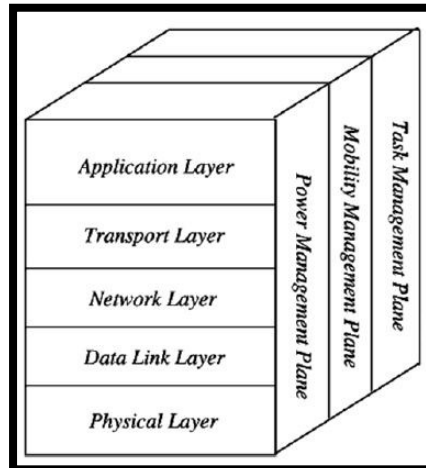


Figura 16 - Stack de protocolo [23]

3.2. Arquitetura Geral do Sistema

O sistema de deteção de colisões foi desenhado segundo uma topologia em estrela (com potencial para ser implementada uma topologia híbrida) e está dividido em 2 subsistemas: serviços de *Internet* (serviço e aplicação) e deteção de colisão (dispositivo final e ponto de acesso). No fundo, existem 4 unidades distintas:

- **Dispositivo Final (*End Device*, ED):** este aparelho é responsável por detetar o impacto sentido pelo rail e comunicar os dados recolhidos com um aparelho de hierarquia superior. Possui um sensor capaz de detetar as vibrações de uma colisão e, quando os valores lidos por este sensor forem superiores aos valores de segurança pré-definidos (*threshold*), será enviada uma mensagem à *gateway* que se encontra ligada a esse ED, para comunicar a leitura efetuada. Os EDs serão sempre colocados em zonas de estradas onde existe uma maior prevalência de acidentes, os chamados pontos negros (*black spots*). De modo a garantir a deteção de qualquer impacto, os EDs devem ser distribuídos, nestas zonas, em intervalos de poucos metros (por exemplo, 5 metros). Este valor e o número de EDs necessários para cada zona de acidentes irá sempre variar consoante a distância que se pretende abranger e, com testes mais exaustivos, o intervalo entre eles pode ser otimizado, de modo a reduzir o número de EDs para os valores somente necessários;

- **Ponto de Acesso (*Access Point/Gateway, AP*):** este dispositivo serve de intermediário na rede. Está responsável por receber/enviar dados dos vários EDs que tenha sobre o seu controlo, e comunicar essas informações para os serviços de *Internet*. O facto de um AP ter uma série de EDs ligados a si permite que, no caso de falha ou destruição de um dos dispositivos, o impacto possa também ser detetado e comunicado ao AP, através de um ED vizinho, que detete a onda de propagação do impacto;
- **Serviços de Internet:** como se trata de uma WSN, ou seja, uma rede *wireless* é necessário haver uma estrutura que receba os dados das *gateways* e que os redirecione para a aplicação do respetivo sistema;
- **Aplicação:** esta interface serve de ligação entre o sistema e o utilizador. Está ligada diretamente aos serviços de *Internet* e pode visualizar os dados recebidos desde os EDs e também fazer pedidos de execução de *software* ou a leitura de novos dados.

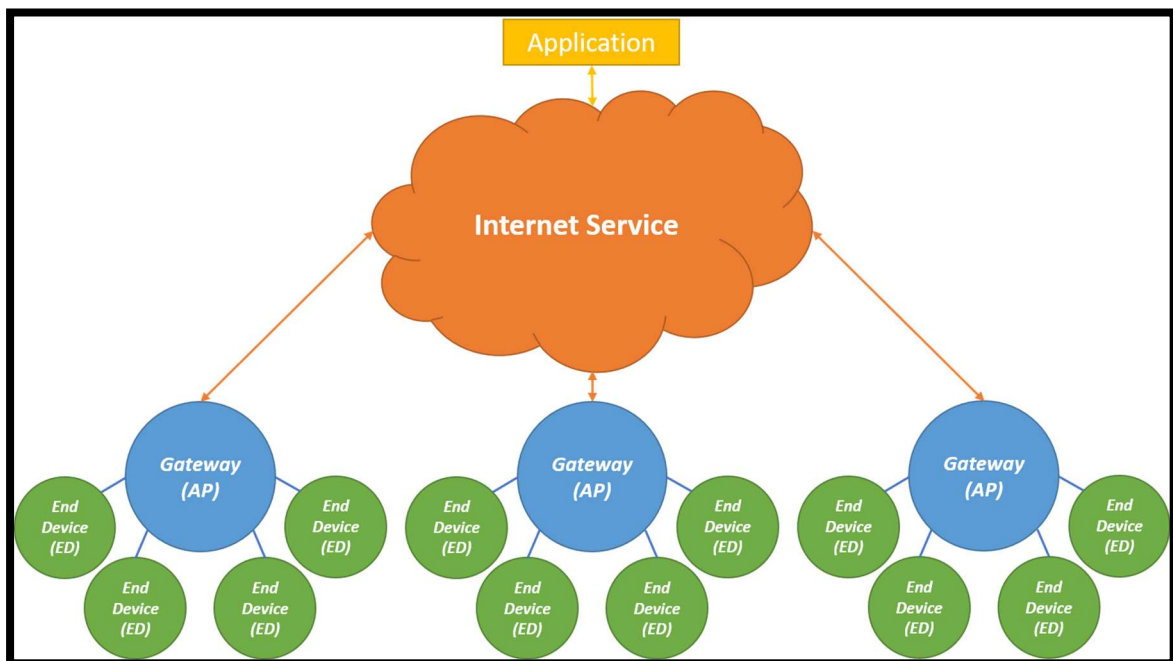


Figura 17 – Arquitetura geral do sistema

Com a arquitetura estruturada (figura 17) é possível criar um diagrama de sequência da deteção de uma colisão (figura 18). Assim, quando um veículo colide com um rail, o sensor mais próximo deteta a colisão e transmite os dados de aceleração para a *gateway* a que está ligado. Em caso de destruição do sensor, é esperado que a onda de propagação da colisão seja detetada por um sensor vizinho. No caso de ser perdida a ligação com o sensor em causa, o programa deve inquirir os sensores próximos sobre possíveis leituras, mesmo que abaixo dos valores de *threshold*. Caso sejam detetados

valores secundários significativos, assume-se que ocorreu uma colisão e prossegue-se com a devida comunicação com a *gateway*. Esta, ao receber os dados do ED, consegue encaminhar a informação, através dos serviços de *Internet*, até à aplicação do utilizador, chegando assim às entidades competentes [25].

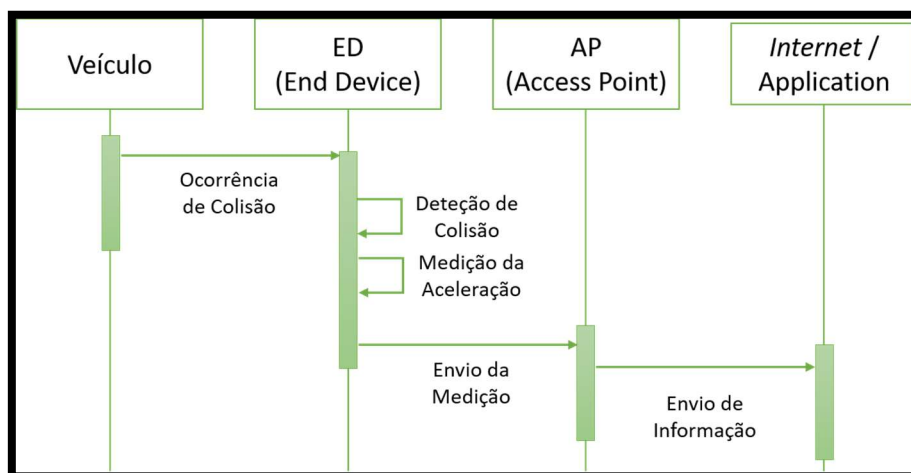


Figura 18 – Diagrama de sequência de uma colisão

Como prova de conceito, o esquema da figura 19 representa a ligação ponto-a-ponto que foi explorada neste trabalho.

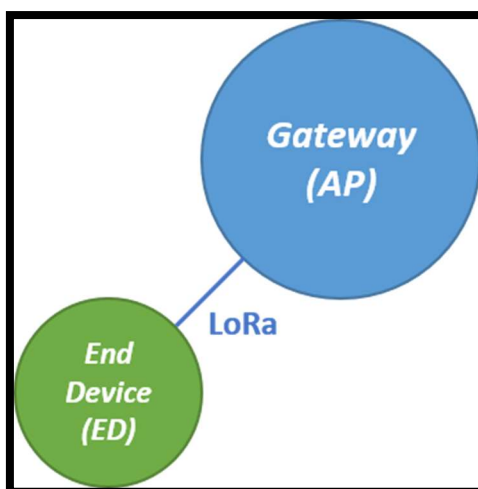


Figura 19 – Ligação ponto-a-ponto entre ED e *gateway*

Os serviços de *Internet*, e posteriormente a aplicação, da rede de LoRaWAN, podem ser implementados com um parceiro do grupo LoRa-Alliance como, por exemplo, o *The Things Network* (TTN). Este tipo de serviço disponibiliza ferramentas gratuitas e a possibilidade de construir uma rede personalizada com uma aplicação de baixo custo, aliada a grandes níveis de segurança e escalabilidade. Através de uma encriptação robusta, consegue-se obter uma rede de IoT segura e colaborativa, que pode ser expandida em grande escala com uma distribuição ponderada de múltiplos EDs associados às respetivas *gateways* [26].

4. Descrição e Implementação dos Dispositivos

Neste capítulo são descritos os dispositivos escolhidos, e as respectivas tecnologias, tendo em conta o estudo efetuado. O modo de funcionamento destes aparelhos é resumido nesta secção, separando ambas as partes da ligação ponto-a-ponto, isto é, as configurações do dispositivo final (ED) e da *gateway*.

4.1. Sensor (ED)

O ADXL345 foi o acelerómetro selecionado para a realização dos testes, sendo uma opção viável pelas dimensões reduzidas e pelos baixos consumos. Outras opções como o CXL10GP3, o LIS331DLH e o ADXL375 foram analisadas, no entanto, como o objetivo desta fase é apenas detetar qualquer situação de impacto, optou-se pela solução de custo mais reduzido, englobando, simultaneamente, um intervalo de medição razoável.

Este é um sensor de aceleração MEMS capacitivo, com alta resolução (13 bits) e com um intervalo de medição máximo de ± 16 g. Os bits digitais de saída são formatados em 16 bits, em complemento para 2, e podem ser acedidos através de SPI ou I²C.

As características gerais deste componente são as seguintes:

- Tensão de alimentação de 2.0 V a 3.6 V;
- Baixa potência no modo leitura, 23 μ A, e extremamente baixa no modo *standby*, 0.1 μ A (leituras a 2.5 V);
- Suporte de várias larguras de banda, incluindo 100 Hz;
- Variação do consumo de potência com o aumento da largura de banda;
- 3 eixos;

- Resolução variável (10 bits fixos ou resolução máxima até 13 bits consoante o intervalo de medição);
- 4 intervalos de medição (± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g);
- Intervalo de temperatura de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$;
- Resistente a choques até 10000 g;
- Comunicação SPI ou I²C.

As restantes especificações do sensor podem ser consultadas no [Anexo 1].

Este sensor é adequado para aplicações que necessitem de dispositivos móveis, conseguindo medir a aceleração estática da gravidade, até em situações de inclinação, e também acelerações dinâmicas resultantes de movimentos ou choques. A alta resolução (3.9 mg/LSB) permite medições de inclinação com menos de 1.0° .

Embora forneça várias funções de sensorização, apenas algumas serão úteis neste trabalho, como é o caso da deteção de atividade e inatividade. Esta funcionalidade deteta a presença, ou falta, de movimento e compara os valores de aceleração, em qualquer eixo, com os valores de *threshold* definidos pelo utilizador. Estas funções, e outras interrupções, podem ser mapeadas para dois pinos de saída de interrupções (INT1 e INT2).

Um sistema integrado de gestão de memória com um *buffer* FIFO (*first in, first out*) de 32 níveis pode ser usado para armazenar dados, minimizando a atividade de processamento do microprocessador e diminuindo o consumo energético do sistema. Este *buffer* tem 4 modos: *bypass*, FIFO, *stream* e *trigger*.

Existem ainda modos de baixa potência capazes de uma gestão baseada no movimento, com sensorização dos níveis de *threshold* e com medições ativas de aceleração, aliadas a níveis baixos de dissipação de potência [27].

Embora não apresente intervalos de medições de 200 g, ideais para a deteção de grandes impactos, este sensor consegue fornecer valores de teste precisos, pelo que se revela uma boa solução. Além disso, quanto maior for o valor máximo de medição, mais caro ficará o sensor, sendo que, para um sistema *low-cost*, é necessário um equilíbrio entre a medição máxima de aceleração do sensor e o seu custo. No entanto, caso sejam necessários intervalos de medições maiores, a mudança de sensor pode ser facilmente implementada com um acelerómetro da mesma família, por exemplo o ADXL375.

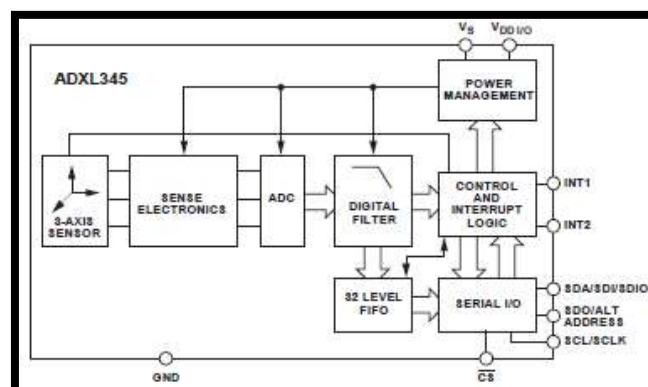


Figura 20 - Diagrama de blocos do acelerómetro ADXL345 [27]

4.1.1. Modo de Funcionamento

O sensor é uma estrutura de superfície de silício policristalino (polissilício), em cima de uma pastilha de silício. As molas de polissilício suspendem a estrutura por cima da pastilha, providenciando uma resistência contra as forças, devido à aceleração aplicada. A deflexão da estrutura é medida através de capacidades diferenciais que consistem em placas fixas independentes e placas agregadas à massa em movimento. Este é o conceito implícito nos acelerômetros MEMS capacitivos. Deste modo, as forças de aceleração defletem a massa de prova e fazem variar as capacidades, resultando numa saída do sensor cuja amplitude é proporcional à aceleração. Uma demodulação em fase é utilizada para determinar a magnitude e polaridade da aceleração.

A potência pode ser aplicada em V_S ou V_{DD} , em qualquer sequência, sem danificar o sensor. Existem 4 modos de potência no sensor: desligado, *bus* ligado, *bus* desligado e *standby* ou medição. O nível de tensão da interface é definido pela tensão de alimentação (V_{DD}), que deve estar sempre presente para não gerar conflitos no *bus* de comunicação. No modo de operação de fonte singular, V_{DD} pode ter o mesmo valor que V_S .

Após aplicar a tensão V_S , o dispositivo entra em modo *standby*, onde o consumo de potência é minimizado e espera-se que a tensão a V_{DD} seja aplicada para se poder passar para o modo de leitura. Adicionalmente, enquanto o dispositivo se encontra em *standby*, qualquer registo pode ser lido ou escrito. É recomendado configurar o dispositivo apenas no modo *standby* e depois passar para o modo de leitura. Ao limpar o bit de leitura, o dispositivo regressa ao modo *standby*.

O ADXL345 adapta automaticamente o consumo de corrente em proporção com a taxa de dados de saída, tal como se demonstra no [Anexo 2]. Caso sejam necessárias poupanças adicionais de energia, existe ainda um modo de baixa potência, em que a taxa de amostragem interna é reduzida, permitindo economizar energia no intervalo de 12.5 Hz a 400 Hz, à custa de um aumento de ruído.

Um modo de *auto-sleep* está também disponível para poupar energia adicional, fazendo o sensor mudar automaticamente para o modo *sleep* quando tem grandes períodos de inatividade. No modo de *standby* consegue-se poupar ainda mais potência, visto que existe um consumo típico de corrente de 0.1 μA , embora neste modo não se possam efetuar leituras [27].

4.1.2. Tipo de Comunicação

Neste sensor estão disponíveis dois tipos de comunicação: SPI e I²C. Em ambos os casos, o ADXL345 opera como um dispositivo escravo (*slave*). Devido à simplicidade de configuração e instalação foi selecionada a comunicação I²C, pelo que apenas esta será abordada. O modo I²C é ativo ao colocar o pino CS no modo alto, ou seja, igual à tensão V_{DD} . Qualquer transmissão de dados, do sensor para o aparelho mestre (*master*), será

ignorada quando se estiver a escrever no sensor.

O protocolo I²C foi desenvolvido para permitir a comunicação entre múltiplos circuitos integrados (*slaves*) e um ou mais microprocessadores (*masters*) [28].

Existem 2 modos de transferência de dados: padrão, a 100 kHz, e rápido, a 400 kHz, podendo suportar escrita/leitura de múltiplos bytes. Um par de resistências externas de *pull-up* (R_p) é necessário para um melhor funcionamento do protocolo de I²C [27].

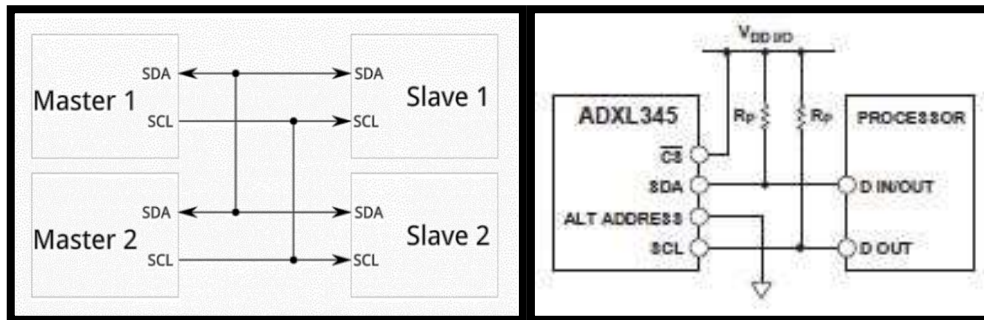


Figura 21 – Diagrama do protocolo I²C (esquerda) e respetiva ligação do ADXL345 (direita) [27] [28]

4.1.3. Implementação do Sensor

O acelerómetro ADXL345 utilizado neste projeto vem incluído numa placa de desenvolvimento equipada com 3 condensadores adicionais, para desacoplamento (*decoupling*) da fonte de alimentação. Este desacoplamento permite uma maior imunidade ao ruído.

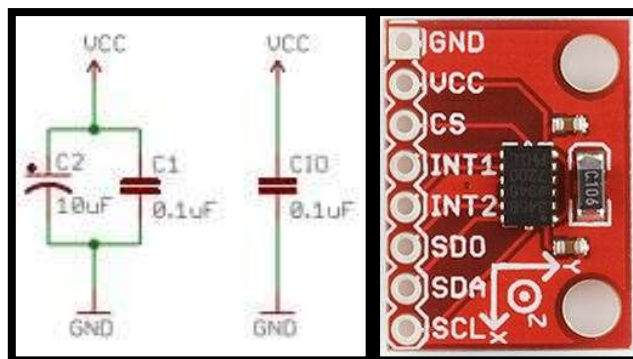


Figura 22 – Condensadores de desacoplamento (esquerda) e placa com o sensor ADXL345 (direita) [29]

Com o protocolo de comunicação I²C, as ligações ficam mais simplificadas, pois são efetuadas de uma forma direta, não sendo necessário um conversor de tensão.

A placa de desenvolvimento utilizada para estes testes foi um Arduino Uno. Esta placa é baseado no microcontrolador ATmega328P. Possui 14 pinos digitais de entrada/saída (6 dos quais podem ser saídas de PWM), 6 entradas analógicas, cristal de quartzo de 16 MHz, conector USB, botão de *reset*, entre outros. Funciona a 5 V sendo que a tensão de entrada na placa deve rondar os valores recomendados de 7 a 12 V. A corrente

DC num pino de entrada/saída é de 20 mA e no pino de 3.3 V é de 50 mA [30].

A tabela 4 descreve os pinos da placa do ADXL345 e as respetivas ligações que devem ser efetuadas no Arduino Uno. Estas ligações estão também descritas na figura 23.

Sigla	Descrição	Ligação ao Arduino
GND	Ligação à terra (<i>ground</i>)	GND
VCC	Tensão de alimentação	3.3 V
CS	Seleção de <i>chip</i>	3.3 V
INT1	Saída de interrupção 1	-
INT2	Saída de interrupção 2	-
SDO	Seleção de endereço (I ² C)	GND
SDA	Ligação dos dados (I ² C)	SDA
SCL	Ligação do relógio (<i>clock</i>)	SCL

Tabela 4 – Pinos da placa do ADXL345 e ligações ao Arduino [29]

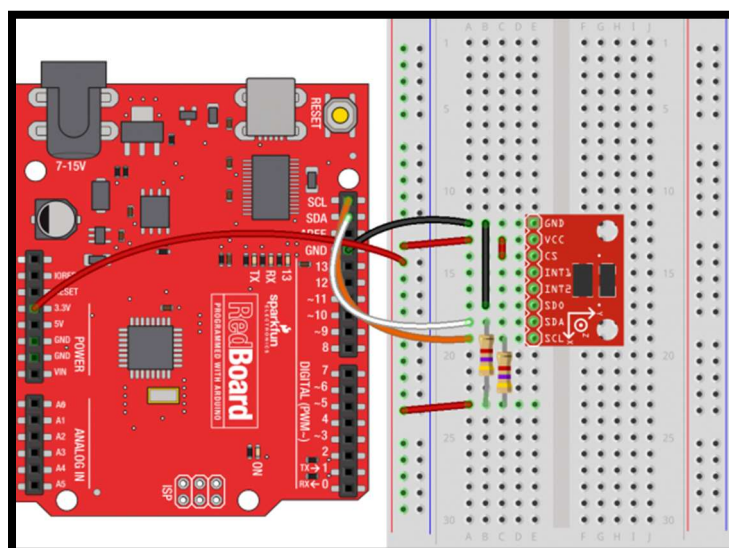


Figura 23 – Esquema de ligações entre a placa do ADXL345 e o Arduino [29]

Os registos do sensor estão disponíveis no [Anexo 3].

A placa do ADXL345, desenvolvida pela Sparkfun, disponibiliza uma biblioteca compatível com o *Integrated Development Environment* (IDE) do Arduino. Dentro desta é possível encontrar várias funções implementadas que ajudam na interação entre as partes de *software* e de *hardware*. Na secção dos anexos encontra-se uma lista das principais funções utilizadas [Anexo 4].

Numa fase inicial foi implementado um excerto de *software* segundo o fluxograma da figura 24, de modo a configurar e calibrar o acelerómetro. Após a junção com o módulo do LoRa, o fluxograma terá todas as fases necessárias para o funcionamento de um ED, incluindo a parte do sensor e a parte de comunicação.

Após a inicialização do construtor, o dispositivo é ligado e são configuradas as funções de atividade e inatividade, bem como a definição do alcance de aceleração. Como se pretende simular grandes impactos, este valor deve ser o máximo permitido na escala do

aparelho, ou seja, 16 g. Antes de terminar a fase de *setup* é necessário ativar as interrupções das funções. Na fase de *loop*, são feitas leituras de aceleração, sendo estas comparadas com o valor de *threshold* imposto. No caso de um valor de aceleração igual ou superior ao valor de *threshold*, uma mensagem será impressa, caso contrário, o programa salta para a rotina de interrupções (ISR). No caso afirmativo, e após o envio da mensagem, o programa segue também para a ISR. Nesta rotina são executadas ações para verificar o estado atual das funções de atividade e inatividade e imprimir uma mensagem caso seja verificada uma destas situações. Como alternativa, e de modo a implementar um sistema de baixo consumo, a função de atividade pode ser configurada para detetar diretamente uma colisão, podendo contemplar assim os modos de poupança de energia.

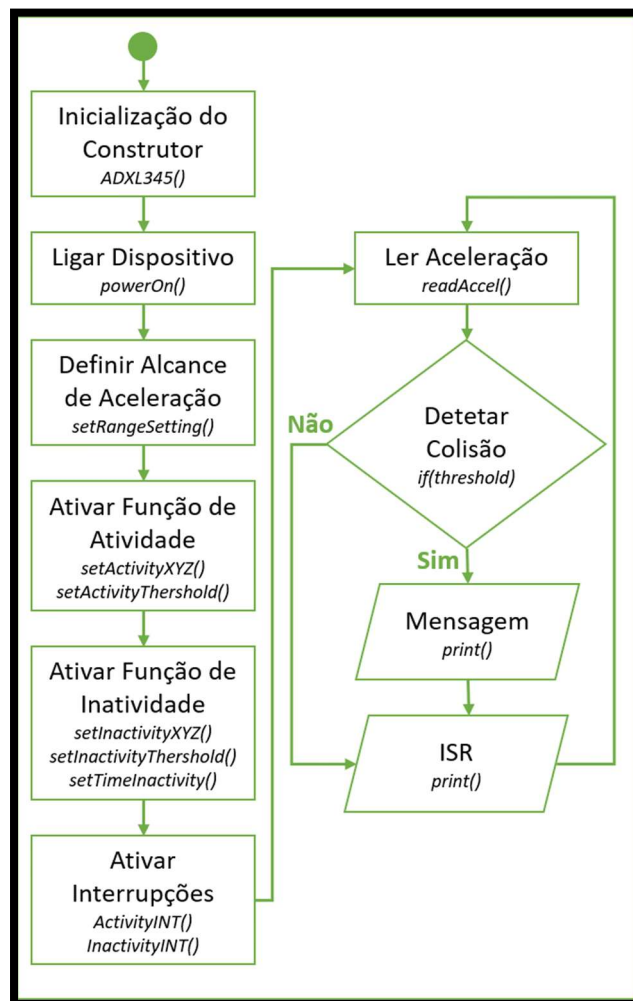


Figura 24 – Fluxograma de teste do sensor ADXL345

4.2. LoRa (ED e Gateway)

A tecnologia de LPWAN que mais se adequa neste projeto, devido às suas

características de longa distância, taxas de transmissão razoáveis, baixo custo, entre outras, é o LoRa. Esta tecnologia pertence à empresa Semtech, que tem a sua propriedade intelectual cedida a outras empresas como a HopeRF, a Microchip e a Dorji. O módulo SX1276, da Semtech, foi implementado no dispositivo final (ED) e o módulo RFM95W, da HopeRF, foi implementado na *gateway*. Como funcionam de igual modo, ou seja, têm as mesmas características e os mesmos registos, será apenas tratado o módulo da Semtech.

4.2.1. Descrição Geral

O SX1276 é um *transceiver* da tecnologia LoRa que garante comunicações de longa distância, segundo a modulação CSS, com uma grande imunidade a interferências, enquanto mantém um consumo energético reduzido. Através desta modulação patenteada, consegue-se obter sensibilidades de -148 dBm, usando um cristal de baixo custo. Esta alta sensibilidade, combinada com um amplificador de potência integrado de +20 dBm, aumenta significativamente o *link budget* (somatório de todos os ganhos e perdas numa transmissão de sinal), tornando este dispositivo um dos líderes do mercado para aplicações que necessitem de longo alcance e robustez. O LoRa fornece avanços significativos em termos de métodos de bloqueio e seletividade, quando comparado com outras técnicas de modulação, resolvendo o compromisso tradicional entre alcance, imunidade a interferências e baixo consumo energético. Estas funcionalidades garantem uma maior confiabilidade na comunicação.

As características deste componente são as seguintes:

- Máximo *link budget* de 168 dB;
- Amplificador de potência, de alta eficiência, de +14 dBm;
- Taxa de dados programável até 300 kbps;
- Alta sensibilidade, até -148 dBm;
- Excelente imunidade;
- Baixa corrente no recetor, 9.9 mA;
- Sintetizador integrado com resolução de 61 Hz;
- Modulações de FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK e LoRa;
- Sincronizador de bit para recuperação do relógio (*clock*);
- Deteção de *preamble*;
- Intervalo dinâmico do RSSI de 127 dB;
- Sensor de temperatura incorporado e indicador de bateria fraca.

As restantes especificações deste módulo podem ser consultadas no [Anexo 5].

A modulação de dispersão do espectro é capaz de atingir distâncias mais longas que os sistemas que incorporam modulações baseadas em *Frequency-Shift Keying* (FSK) ou *On-Off Modulation* (OOK), pelo que, apenas serão mencionadas as funcionalidades para o LoRa. No nível máximo de transmissão de dados, a sensibilidade do sistema é maior em 8 dB quando comparado com um sistema FSK. Para uma maior flexibilidade, os valores de

largura de banda, fator de dispersão (*spreading factor*) e a taxa de correção de erro podem ser ajustados de acordo com os parâmetros necessários para a aplicação. Outro benefício da modulação de dispersão é o facto de esta ser ortogonal, ou seja, múltiplos sinais transmitidos podem ocupar o mesmo canal sem haver interferências. A largura de banda pode variar entre 7.8 kHz e 500 kHz, sendo que o fator de dispersão varia entre 6 e 12, em todas as frequências disponíveis.

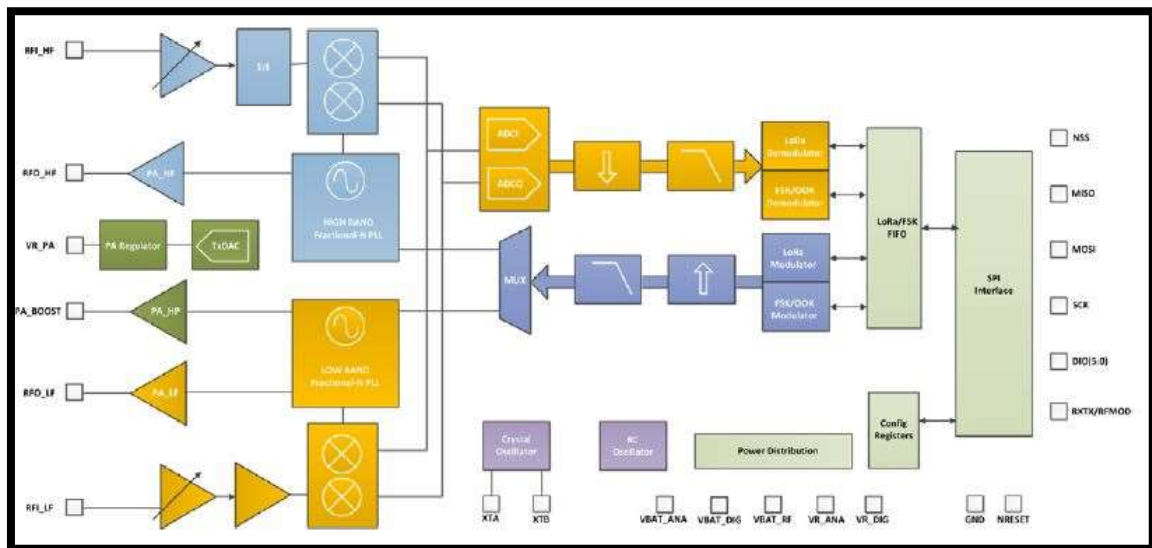


Figura 25 – Diagrama de blocos simplificado do SX1276 [31]

O SX1276 é um *transceiver* de frequência intermédia (IF) e *half-duplex* (comunicação bidirecional mas não simultânea). Aqui, o sinal de RF passa primeiro pelo amplificador de baixo ruído (*low noise amplifier*, LNA), onde as entradas são de extremidade única para minimizar o uso de materiais externos e facilitar o respetivo design. Após as entradas do LNA, a conversão para diferencial é efetuada de modo a melhorar a linearidade de segunda ordem e a rejeição das harmónicas. O sinal é, então, convertido em componentes de fase e quadratura na frequência intermédia, pelo misturador (*mixer*, em inglês). Um par de conversores analógicos-digitais sigma-delta (ADCs) executam uma conversão dos dados, com todo o processamento e desmodulação subsequentes do sinal, no domínio digital. A máquina de estados digital controla também a correção de frequência automática (*automatic frequency correction*, AFC), o indicador de intensidade do sinal recebido (*received signal strength indicator*, RSSI) e o controlo de ganho automático (*automatic gain control*, AGC).

Os sintetizadores de frequência geram a frequência do oscilador local, tanto para o recetor como para o transmissor, uma para a banda UHF inferior (até 525 MHz) e outra para a banda UHF superior (a partir de 779 MHz). Os ciclos de bloqueio de fase (PLLs) são otimizados para baixos tempos de bloqueio e para uma operação rápida de calibração automática. Na transmissão, a modulação de frequência é realizada digitalmente, dentro da largura de banda do PLL, sendo que este também incorpora uma pré-filtragem opcional do fluxo de bits, para melhorar a pureza espectral.

O módulo tem ainda três amplificadores de potência (RF). Dois deles, ligados ao RFO_LF e ao RFO_HF, podem fornecer até +14 dBm, mas não estão regulados para alta eficiência de potência, podendo ser ligados diretamente às entradas do respetivo recetor de RF, através de um par de componentes passivos, de forma a estabelecer um único *transceiver* de alta eficiência na porta da antena. O terceiro amplificador, ligado ao pino PA_BOOST pode fornecer até +20 dBm, através de uma rede dedicada. Ao contrário dos amplificadores de alta eficiência, este último, de alta estabilidade, engloba todas as bandas de frequência endereçadas pelo sintetizador de frequências. No entanto, segundo a legislação portuguesa, publicada pelas autoridades competentes (ANACOM e delegação europeia, ETSI), a potência máxima permitida num transmissor é de 25 mW, o que equivale a cerca de 14 dBm [32]. O módulo inclui ainda duas referências temporais, um oscilador RC (resistências e condensadores) e um oscilador de cristal de 32 MHz.

Todos os principais parâmetros da máquina de estados digital são totalmente configuráveis por meio de uma interface SPI, que garante o acesso aos registos de configuração disponíveis. Isto inclui um sequenciador automático para supervisionar a transição e calibração do SX1276, entre os modos intermédios de operação, no menor tempo possível [31].

4.2.2. Modulação *Chirp Spread Spectrum*

A tecnologia LoRa é um esquema de modulação proprietária de dispersão de espectro, baseada na modulação de *chirp spread spectrum* (CSS). Esta técnica permite um aumento do *link budget* e uma maior imunidade à interferência na banda. Esta imunidade permite a coexistência de diversos sistemas LoRa, e de um uso pesado do espectro, mas também em redes de comunicação híbridas, que utilizam o LoRa para estender o alcance. O LoRa utiliza esta modulação, em conjunto com técnicas de correção de erro, para conseguir aumentar o alcance e a robustez das ligações de comunicação rádio [31].

O CSS é uma técnica de dispersão de espectro que utiliza pulsos de *chirp*, modulados numa frequência linear de banda larga, para codificar informações. Um *chirp*, também conhecido como sinal de *sweep*, é um tom no qual a frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*), com o tempo. As técnicas de dispersão de espectro são métodos nos quais o sinal é deliberadamente espalhado no domínio da frequência, ou seja, um sinal é transmitido em pequenas “rajadas”, saltando entre frequências numa sequência pseudoaleatória. Os sinais de *chirp* são usados como sinais da portadora, nos quais uma mensagem está codificada. Nas figuras 26 e 27 estão alguns exemplos destes sinais [20].

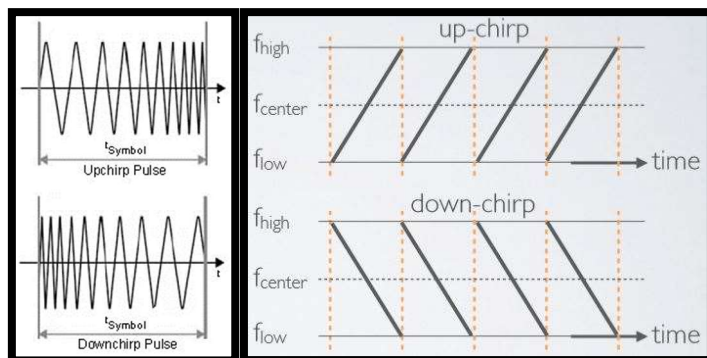


Figura 26 – Exemplos dos sinais *up-chirp* e *down-chirp* [20] [33]

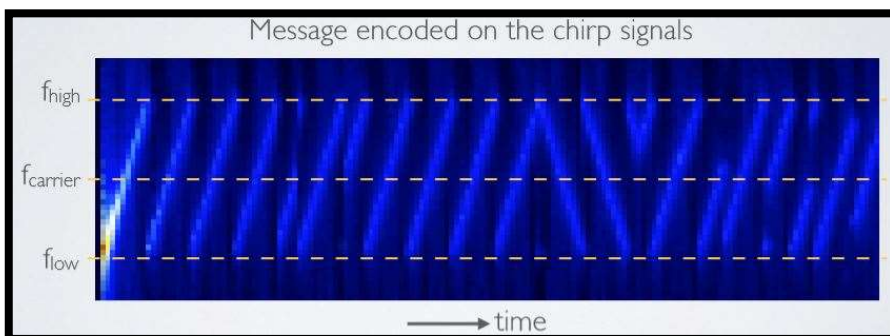


Figura 27 – Exemplo de uma mensagem codificada em sinais *chirp* [20]

4.2.3. Modem LoRa

O modem (modulador/desmodulador) LoRa está descrito na figura 28.

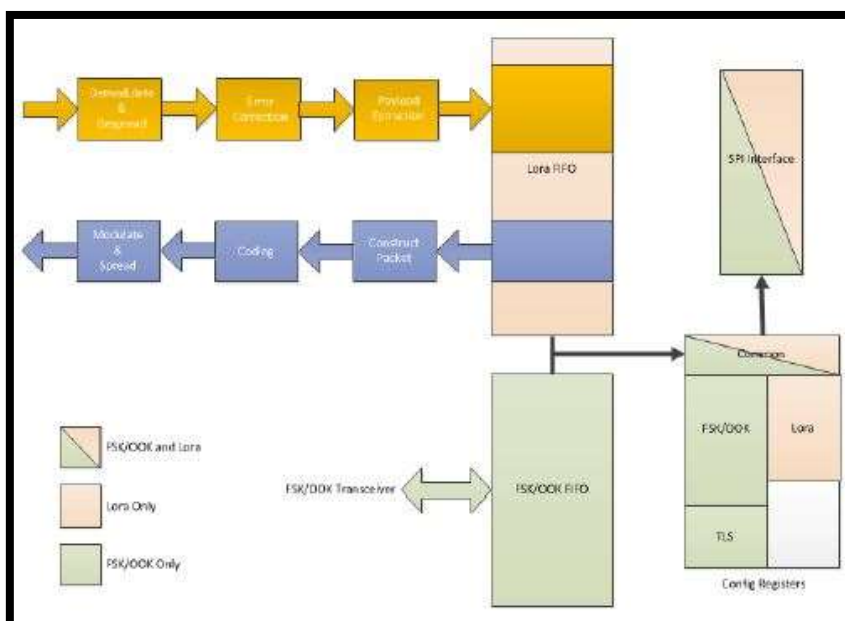


Figura 28 – Esquema do modem LoRa [31]

Esta configuração permite uma simples substituição do modem FSK com o modem LoRa, através da configuração do respetivo registo. Esta alteração pode ser realizada em qualquer altura, desde que o módulo esteja no modo *sleep*, antes de realizar a operação. A modulação e desmodulação do LoRa é um processo proprietário, usando a modulação de dispersão do espectro combinada com uma correção de código cíclica.

Um esboço simplificado dos processos de transmissão e receção é também exibido na figura 28. O modem possui um *buffer* de dados FIFO, com duas portas independentes, que pode ser acedido através de uma interface SPI comum a todos os modos. Após a seleção do modo, o mapeamento dos registos de configuração muda. Assim, é possível otimizar a modulação LoRa para uma aplicação específica, através de três parâmetros: largura de banda, fator de dispersão (*spreading factor*) e taxa de codificação. A interação entre estes parâmetros permite estabelecer vários compromissos entre *link budget*, imunidade a interferências, ocupação de espectro e taxas de dados [31].

4.2.4. *Spreading Factor*

A modulação de dispersão de espectro é realizada ao representar cada bit do *payload* por múltiplos *chips* de informação. A taxa a que esta informação dispersa é enviada denomina-se de taxa de símbolo (R_s , *symbol rate*), e representa a razão entre a taxa de símbolo nominal e a taxa de *chip*, ou seja, o fator de dispersão (*spreading factor*). O *spreading factor* representa assim o número de símbolos enviados por bit de informação. O intervalo de valores válidos pelo modem LoRa é descrito na tabela 5.

<i>Spreading Factor</i> (SF)	<i>Spreading Factor</i> (chips/symbol)	Desmodulador LoRa (SNR) [dB]
6	64	-5
7	128	-7.5
8	256	-10
9	512	-12.5
10	1024	-15
11	2048	-17.5
12	4096	-20

Tabela 5 – Intervalo de valores para o *spreading factor* (SF) [31]

O valor de SF terá de ser conhecido com antecedência, tanto no transmissor como no recetor, antes de poder ocorrer alguma comunicação, pois diferentes fatores de dispersão são ortogonais uns aos outros. O valor de SNR, expresso na tabela, diz respeito ao valor necessário à entrada do recetor e representa a capacidade de receber sinais com SNR negativo, de modo a aumentar a sensibilidade [31].

4.2.5. Taxa de Codificação

Para aumentar a robustez da ligação do modem LoRa é empregue uma codificação de erro cíclica capaz da deteção avançada de erro e da respetiva correção.

Taxa de Codificação	Taxa de Codificação Cíclica	Razão de <i>Overhead</i>
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

Tabela 6 – Diferentes taxas de codificação (CR) [31]

A correção avançada de erro (*forward error correction*, FEC) é particularmente eficiente para melhorar a confiança na ligação aquando da presença de interferências. De modo a que a taxa de codificação (*coding rate*, CR), e a respetiva robustez sobre interferências, possam ser alteradas conforme as condições do canal, a própria taxa de codificação pode ser, opcionalmente, incluída no cabeçalho do pacote, para uso do recetor [31].

4.2.6. Largura de Banda

Um aumento na largura de banda (*bandwidth*, BW) do sinal permite o uso de taxas de dados de maior eficiência, no entanto, reduz o tempo de transmissão a custo da redução do aumento da sensibilidade. A largura de banda, no modem LoRa, refere-se à largura da banda lateral dupla, ou seja, a largura de banda total do canal.

<i>Bandwidth</i> (BW) [kHz]	<i>Spreading Factor</i> (SF)	<i>Coding Rate</i> (CR)	R_b [bps]
7.8	12	4/5	18
10.4			24
15.6			37
20.8			49
31.2			73
41.7			98
62.5			146
125			293
250			586
500			1172

Tabela 7 – Diferentes opções de largura de banda (BW) [31]

Como se pode verificar pelos dados da tabela 7, com a diminuição da largura de banda, o número de bits que podem ser transmitidos é menor. Para as larguras de banda

abaixo dos 62.5 kHz, é necessária a utilização de uma referência de frequência, como o TCXO (oscilador de cristal com compensação de temperatura) [31]. A adição deste elemento é requerida para atingir as especificações de tolerância do erro de frequência, pelo que apenas serão consideradas as frequências que não necessitem desta referência.

4.2.7. Estrutura do Pacote

O modem LoRa possui dois tipos de formato de pacote: explícito e implícito. O pacote explícito inclui um pequeno cabeçalho que contém informação sobre o número de bytes, a taxa de codificação e sobre o uso, ou não, da verificação cíclica de redundância (*cyclic redundancy check*, CRC), sendo que o formato implícito não apresenta este cabeçalho. O formato geral, apresentado na figura 29, é assim composto por três elementos principais: *preamble*, cabeçalho (*header*) opcional e informação (*payload*). Devido aos altos valores do fator de dispersão (SF), existe a possibilidade de haver transmissões de pacotes de longa duração, pelo que está disponível um otimizador de baixa taxa de informação para melhorar a robustez das transmissões contra a variação de frequências, na duração total do pacote. Este otimizador deve estar sempre ligado quando a duração do símbolo demora mais que 16 ms [31].

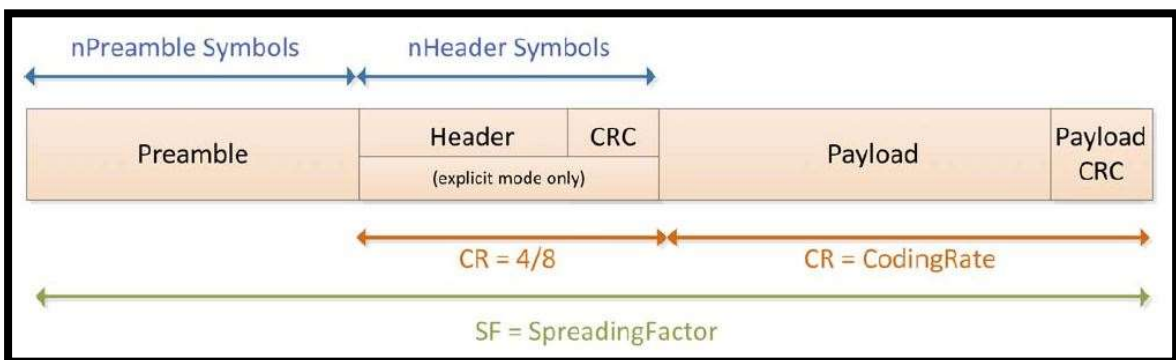


Figura 29 – Estrutura de um pacote LoRa [31]

- **Preamble**

O *preamble* é utilizado para sincronizar o recetor com o fluxo de dados recebidos. Por defeito, o pacote é configurado com uma sequência de 12 símbolos. Esta é uma variável programável, pelo que este tamanho pode ser alterado, caso seja necessário um *duty-cycle* mais baixo. No entanto, o comprimento mínimo é suficiente para todas as comunicações. O comprimento do *preamble* pode variar entre 6+4 até 65535+4 símbolos, já com a adição do *overhead*. O recetor realiza o processo de deteção do *preamble*, que é reiniciado periodicamente. Por essa razão, o comprimento deste deve ser igual ao comprimento do *preamble* do transmissor.

- **Cabeçalho (*Header*)**

Dependendo do modo de operação escolhido, existem dois tipos de cabeçalhos disponíveis: explícito e implícito. No modo explícito, o modo por defeito, o *header* fornece informações sobre os bits de informação (*payload*): comprimento em bytes, taxa de codificação de FEC e presença de CRC de 16 bits. O *header* é transmitido com um código de correção de erro máximo (4/8) e tem o seu próprio CRC para permitir ao recetor descartar cabeçalhos inválidos. Em cenários onde o *payload*, a taxa de codificação e a presença de CRC são fixos, ou conhecidos antecipadamente, pode ser vantajoso reduzir o tempo de transmissão, através do modo implícito. Neste modo, o *header* é removido do pacote e as informações mencionadas necessitam de ser inseridas manualmente.

- ***Payload***

O *payload* do pacote consegue variar de tamanho consoante a informação que necessita de transmitir, estando esta codificada com a taxa de erro pré-definida. Um CRC pode ser ligado opcionalmente. Para uma combinação dos fatores de dispersão do espectro (SF), taxa de codificação (CR) e largura de banda (BW), o tempo no ar da transmissão (*time on air*, ToS) deve ser calculado. De acordo com a legislação, o *duty-cycle* está limitado a 1%, pelo que é necessário calcular este tempo antes de se poder enviar uma segunda mensagem [32].

Com o conhecimento dos principais parâmetros, a taxa de símbolo é um sinal em constante evolução, sendo que um chip é enviado por segundo por hertz da largura de banda. Assim, a taxa de símbolo vem:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{1}{R_s} \quad (3)$$

A duração do pacote é a soma da duração do *preamble* com a duração do pacote transmitido. A duração do *preamble* é calculada da seguinte forma:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) * T_s \quad (4)$$

O $n_{preamble}$ é o valor programado do comprimento do *preamble*. Em geral, este comprimento tem o valor de 8 símbolos. A duração do *payload* depende do modo do pacote selecionado. A fórmula seguinte representa o

número de símbolos do *payload*:

$$n_{payload} = 8 + \max\left(\left\lceil \frac{(8 * PL - 4 * SF + 28 + 16 * CRC - 20 * IH)}{4 * (SF - 2 * DE)} \right\rceil * (CR + 4), 0\right) \quad (5)$$

O valor de PL representa o número de bytes do *payload* (1 a 255), SF é o *spreading factor* (6 a 12), CRC é igual a “1” se esta função for utilizada senão é igual a “0”, IH é igual a “0” quando o *header* está ativo e igual a “1” quando não está presente, DE é igual a “1” se o otimizador de baixa taxa de informação estiver ativo ou igual a “0” em caso contrário e CR é a taxa de codificação (“1” corresponde a 4/5, até “4” que corresponde a 4/8). A duração do *payload* é a multiplicação do período do símbolo pelo número de símbolos do *payload*:

$$T_{payload} = n_{payload} * T_S \quad (6)$$

Finalmente, o tempo no ar (duração do pacote) é simplesmente a soma das durações do *preamble* e do *payload*:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (7)$$

4.2.8. Interface Digital

O modem LoRa compreende três tipos de interface digital: registos de configuração estáticos, registos de estados e um *buffer* de dados FIFO. Todas estas são acedidas através de uma interface de SPI. Todos os registos de configuração podem ser consultados no [Anexo 6]. Estes registos podem ser lidos em qualquer um dos modos de funcionamento, incluindo o modo *sleep*. No entanto, apenas podem ser escritos nos modos de *sleep* e *standby*. Os registos de estado providenciam informação sobre o estado da operação de receção. Um *buffer* de dados (FIFO) com 256 bytes de RAM está disponível neste módulo. Este pode ser configurado pelo utilizador e permite ter acesso aos dados recebidos e enviados (configuração de duas portas).

Um esquema deste *buffer* está presente na figura 30.

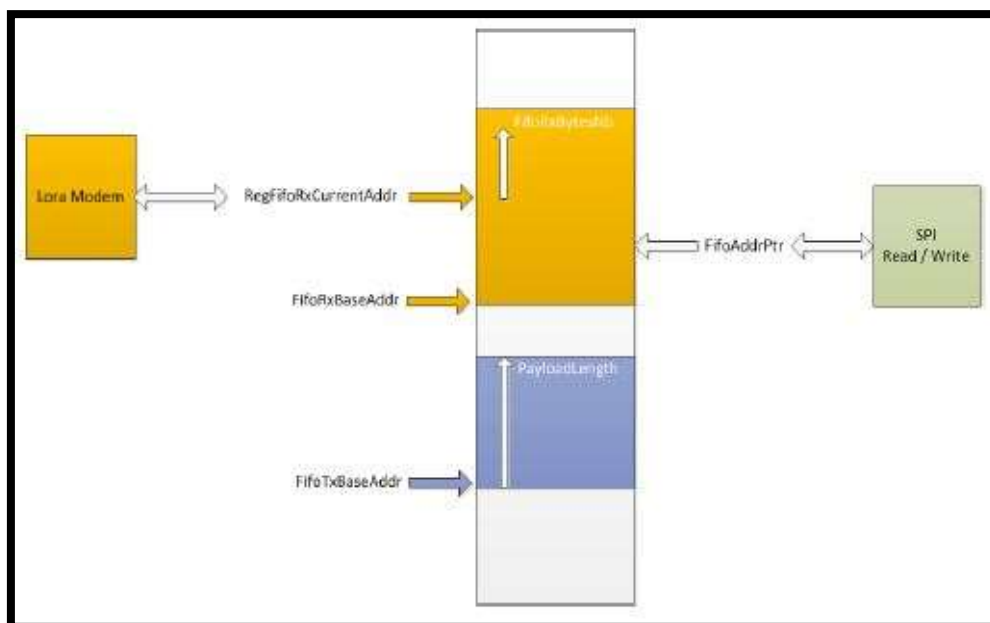


Figura 30 – Buffer de dados [31]

4.2.9. Modos de Operação

O modem LoRa possui 8 modos de operação que estão descritos na tabela 8:

Modos de Operação	Descrição
<i>Sleep</i>	Modo de baixa potência; Registos e SPI acessível; FIFO não acessível.
<i>Standby</i>	Oscilador e blocos de banda base ligados; RF e PLL desligados.
FS-Tx	Sintetizador de frequência para a transmissão; PLL ativo.
FS-Rx	Sintetizador de frequência para a receção; PLL ativo.
Tx	Liga os blocos de transmissão, transmite e retorna ao modo <i>standby</i> .
Rx-Continuous	Liga os blocos de receção e processa dados recebidos até novo pedido.
Rx-Single	Liga os blocos de receção, processa dados e retorna ao modo <i>standby</i> .
CAD	Verifica um canal para detetar um sinal de <i>preamble</i> .

Tabela 8 – Modos de operação do modem LoRa [31]

4.2.10. Máquina de Estados

As seqüências da máquina de estados do modem LoRa podem ser divididas em transmissão e receção. Existe ainda a deteção de atividade no canal para detetar sinais de *preamble*.

- **Seqüência de Transmissão de Dados**

No modo de transmissão, o consumo energético é otimizado ao ativar os blocos de RF, PLL e PA, apenas quando um pacote de dados

precisa de ser transmitido. A figura 31 mostra uma sequência de transmissão de dados.

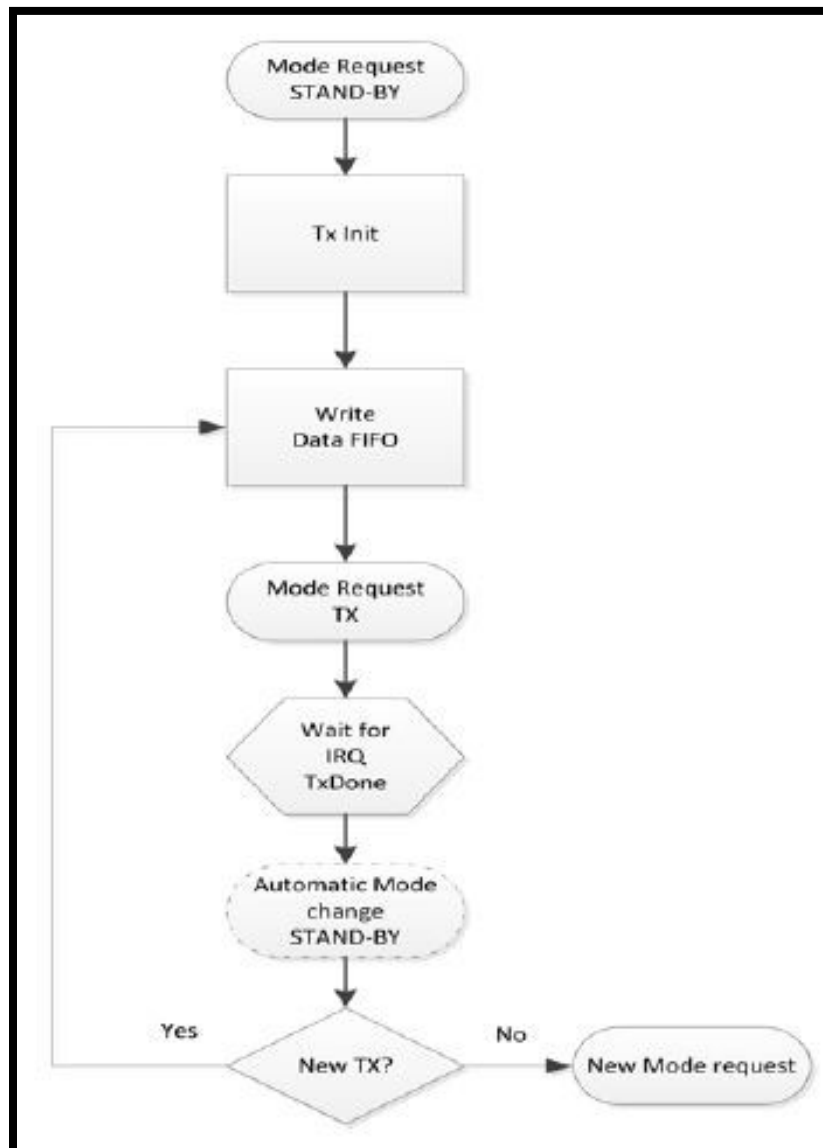


Figura 31 – Sequência de transmissão de dados [31]

Esta sequência possui ainda as seguintes características: os registros de configuração apenas podem ser acessados nos modos de *sleep*, *standby* ou FS-Tx; a *buffer* FIFO apenas pode ser preenchido no modo *standby*; a transmissão de dados é iniciada ao enviar um pedido ao modo Tx; após completar a transmissão retorna ao modo *standby*; após a transmissão pode ser colocado no modo *sleep* ou pode preencher a *buffer* para uma nova transmissão [31].

- **Sequência de Recepção de Dados**

Numa sequência de recepção existem dois modos de operação

possíveis: contínuo (*continuous*) e singular (*single*). A figura 32 mostra uma sequência de recepção de dados.

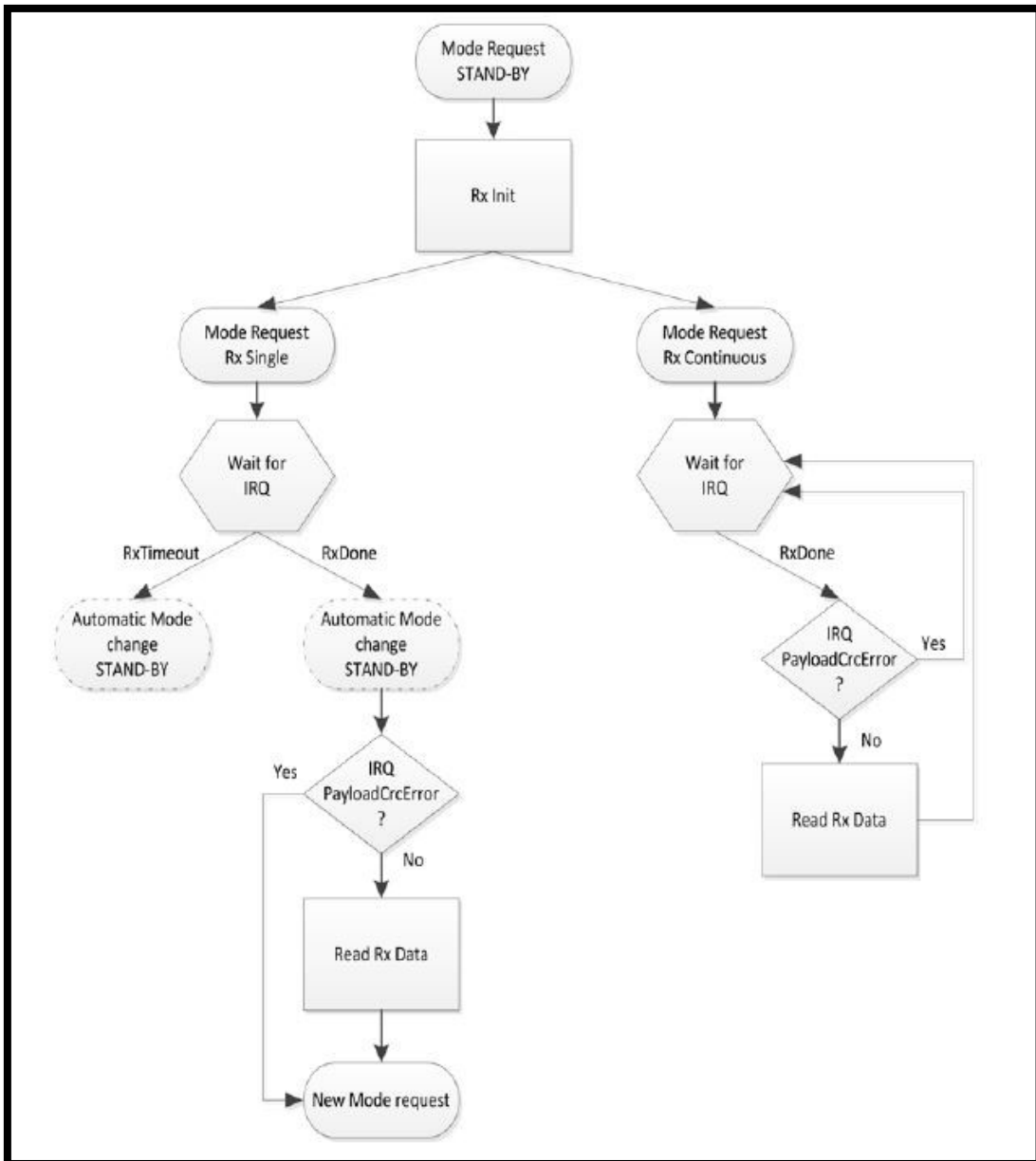


Figura 32 – Sequência de recepção de dados [31]

No modo de recepção singular (*single*), o modem procura pelo *preamble* durante um certo período de tempo. Caso não seja encontrado, é gerada uma interrupção e retorna-se ao modo *standby*. O comprimento da janela de recepção deve estar no intervalo de 4 (tempo mínimo para detectar um *preamble*) a 1023 símbolos. No final do *payload*, são geradas duas interrupções (fim e erro) se o CRC não for válido, no entanto, mesmo quando o CRC não é válido, os dados são gravados no *buffer* para pós-processamento. Após a interrupção de fim retorna-se ao modo de *standby*.

O modem também retorna automaticamente ao modo de *standby* quando a interrupção de fim é gerada, pelo que este modo só deve ser utilizado quando se conhece o tempo de chegada dos pacotes. Caso contrário, o modo de recepção contínuo deve ser utilizado. No modo singular é possível obter baixos consumos energéticos ao desligar os blocos de PLL e RF assim que os pacotes são recebidos. A sequência tem início ao selecionar o modo Rx-Single. O recetor espera depois pela recepção de um *preamble* válido. Quando recebido, o ganho da cadeia de recepção fica estabelecido e o processo de recepção tem início. Ao ficar concluído, a interrupção de fim é gerada e retorna-se ao modo *standby*. Se um pacote válido for recebido, então o *buffer* poderá ser lido. Este modo é também aconselhado para sistemas que recorram a baterias como fonte de alimentação. Além disso, possui ainda uma funcionalidade de *timeout* que permite que o recetor fique, durante um determinado período de tempo, à espera da recepção de algum pacote, antes de gerar uma interrupção para voltar ao modo *standby*.

No modo de recepção contínuo (*continuous*), o modem procura continuamente por um *preamble*. Cada vez que um é detetado, o modem segue o pacote até este ser recebido, e passa depois para outra procura por um *preamble*. Se o comprimento do *preamble* ultrapassar o tamanho definido previamente, este será descartado e terá início outra procura. Os bytes de desmodulação são escritos na memória do *buffer* pela ordem em que são recebidos. A sequência tem início ao selecionar o modo Rx-Continuous. Após a recepção de um *header* de CRC válido, a interrupção de fim é gerada, e volta-se ao modo de espera por outro pacote. Se um pacote for recebido corretamente, ficará disponível para leitura no *buffer*. O processo de recepção pode ser repetido o número de vezes que se desejar. Neste modo, os registos de estado dizem respeito apenas ao último pacote recebido [31].

- **Deteção de Atividade no Canal**

O uso da técnica de modulação de dispersão de espectro apresenta desafios ao determinar se o canal já se encontra a ser usado por um sinal que possa estar abaixo do nível de ruído do recetor. Por esse motivo, a deteção de atividade no canal (*channel activity detection*, CAD) é utilizada para detetar a presença de outros sinais. A figura 33 retrata este processo.

A deteção de atividade no canal tem como objetivo detetar um *preamble*, num canal de rádio, com a melhor eficiência energética possível. Uma vez que o módulo entre no modo CAD, este irá explorar a banda à procura de algum *preamble*. Durante este modo, acontecem as seguintes operações: PLLs bloqueados; o recetor captura um símbolo de um *preamble* no canal; o recetor e os PLLs desligam-se e começa o processamento digital do modem; este procura pela correlação entre as amostras capturadas e uma

forma ideal de um *preamble*; quando os cálculos terminam é gerada um interrupção de conclusão e, em caso de sucesso da correlação, uma interrupção de detecção é criada; o *chip* volta então ao modo *standby*; se um *preamble* foi detetado, limpa a interrupção, e inicializa a recepção ao mudar para os modos de receção (*single* ou *continuous*) [31].

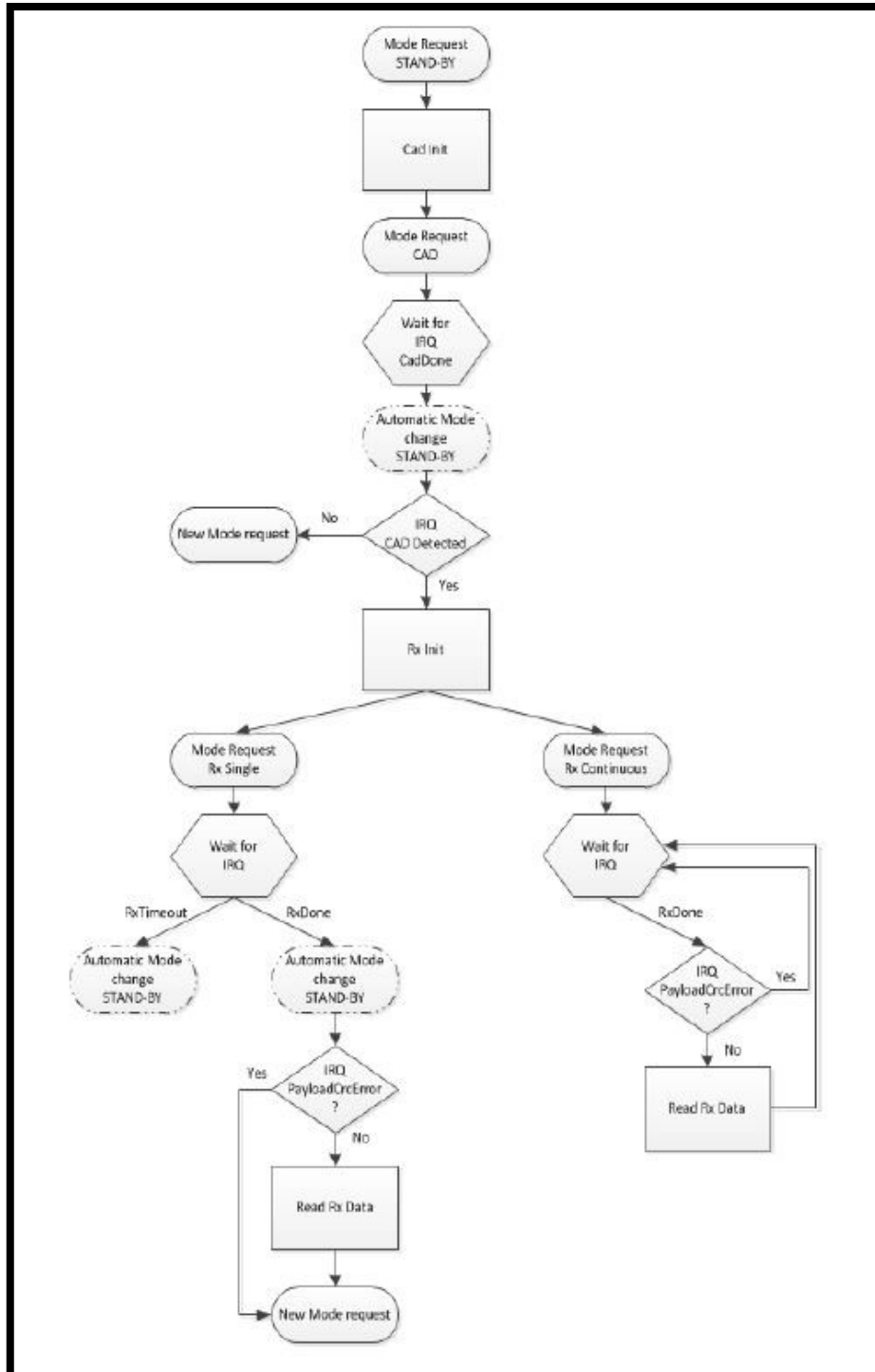


Figura 33 – Processo de detecção de atividade no canal (CAD) [31]

4.2.11. Interface SPI

Esta interface fornece o acesso aos registros de configuração através de um protocolo síncrono e *full-duplex*. Neste caso, apenas a parte *slave* é implementada. Com esta interface são providenciados três modos de acesso: *single*, *burst* e FIFO [31].

- **Acesso *single*:** um byte de endereço, seguido por um byte de dados, é enviado para um acesso de escrita, enquanto que um byte de endereço, seguido por um byte de leitura, é recebido por um acesso de leitura.
- **Acesso *burst*:** um byte de endereço é seguido por vários bytes de dados. O endereço é automaticamente incrementado entre cada byte de dados, sendo que este modo está disponível tanto para acessos de leitura como de escrita.
- **Acesso FIFO:** se o byte de endereço corresponder ao endereço do FIFO, o byte de dados endereçará o FIFO. O endereço não é incrementado automaticamente, mas é memorizado e não precisa de ser enviado entre cada byte de dados.

4.2.12. Transmissor

O transmissor deste módulo incorpora: sintetizador de frequência, modulador (LoRa) e blocos de amplificação de potência, juntamente com as funcionalidades de polarização DC e de rampa do bloco VR_PA.

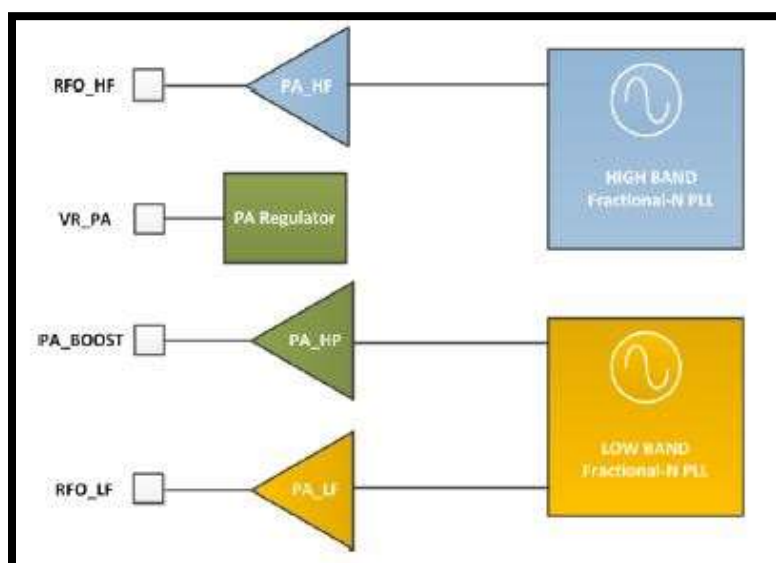


Figura 34 – Configuração interna dos amplificadores de potência [31]

Os amplificadores PA_HF e PA_LF são amplificadores de alta eficiência e capazes de produzir potência de RF, em divisões de 1 dB, de -4 dBm até +14 dBm, diretamente numa carga de 50 Ω , de baixo consumo de corrente. O PA_LF abrange as bandas mais baixas (até 525 MHz), enquanto que o PA_HF cobre as bandas superiores (a partir de 779 MHz). O PA_HP (*high power*), ligado ao pino do PA_BOOST, cobre todas as bandas de frequência endereçadas neste *chip*. Permite assim uma operação contínua até aos +17 dBm e uma operação, com *duty-cycle*, até aos +20 dBm [31]. Para o PA_HP, no pino PA_BOOST, a potência de saída é dada por:

$$P_{out} = 17 - (15 - OutputPower) [dBm] \quad (8)$$

4.2.13. Recetor

Este módulo possui um recetor digital com o processo de conversão analógica-digital (ADC) a ser executado diretamente após o bloco do misturador e do amplificador de baixo ruído (LNA-Mixer). Além do esquema de modulação do LoRa, o recetor de IF consegue desmodular outras modulações como ASK, OOK, (G)FSK e (G)MSK. Toda a filtragem, desmodulação, controlo de ganho, sincronização e manipulação de pacotes é realizada digitalmente, permitindo um elevado grau de flexibilidade programável. O recetor possui ainda uma calibração de ganho automática, que melhora a precisão da medição do RSSI e aprimora a rejeição de imagem. No modo de operação do recetor são definidos dois estados de funcionalidade. Após a transição inicial para este modo, o recetor fica no estado “recetor ligado” (“*receiver-enabled*”). Neste estado, o recetor espera por um *preamble* válido ou pelo cumprimento do critério de deteção do RSSI. Quando cumprido, o recetor entra no estado “ativo” (“*receiver-active*”). Neste segundo estado, o sinal recebido é processado pelo mecanismo de pacotes e pelo sequenciador de nível superior [31].

- **RSSI e SNR**

Um dispositivo LoRa pode medir dois critérios: RSSI (*received signal strength indicator*) e SNR (*signal-to-noise ratio*).

O indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) representa a potência do sinal recebido e é medido em dBm (valores negativos). Este valor é utilizado para verificar a ligação entre o recetor e o transmissor e, com o aumentar da distância, o sinal vai ficando mais fraco, até deixar de ser detetado.

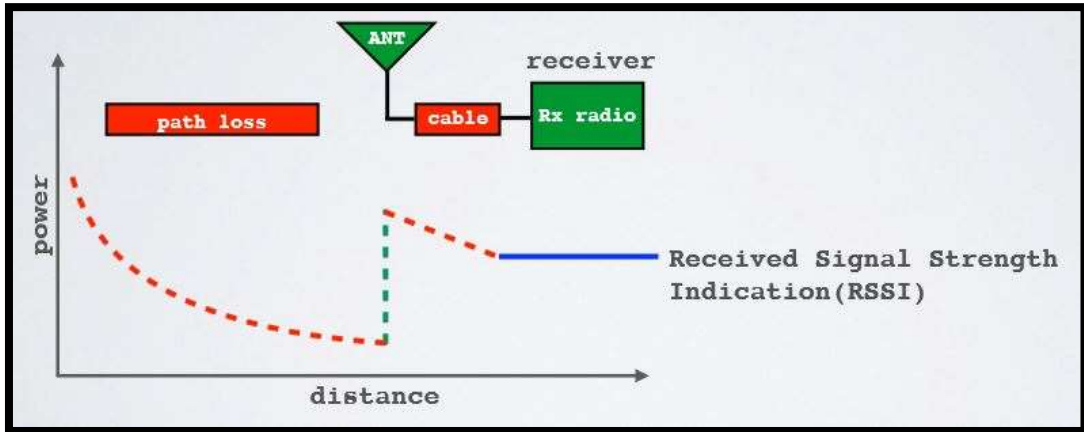


Figura 35 – Esquema do valor de RSSI no recetor [20]

A taxa de sinal/ruído (SNR), medida em dB, representa a relação entre a potência do sinal recebido e o nível do ruído. Este nível representa as interferências que podem corromper o sinal. Normalmente, o LoRa funciona abaixo do limite do nível de ruído (SNR<0) [20].

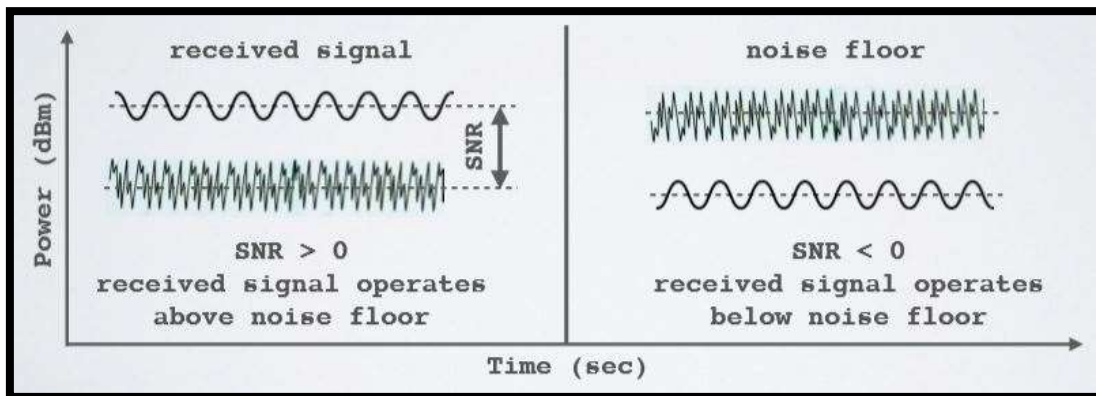


Figura 36 – Esquema da ação do nível de ruído num sinal e o valor de SNR [20]

De modo a obter os valores de RSSI é necessário utilizar os seguintes métodos:

$$RSSI [dBm] = -157 + Rssi (high\ frequency\ (HF)\ port) \quad (9)$$

$$RSSI [dBm] = -164 + Rssi (low\ frequency\ (LF)\ port) \quad (10)$$

Devido à natureza da modulação LoRa, é possível receber pacotes abaixo do nível de ruído (*noise floor*), pelo que, nestas situações, o SNR é usado para determinar a força do sinal do pacote recebido:

$$Packet\ Strength\ [dBm] = -157 + PacketRssi + PacketSnr * 0.25\ (HF\ port, SNR < 0) \quad (11)$$

$$Packet\ Strength\ [dBm] = -164 + PacketRssi + PacketSnr * 0.25\ (LF\ port, SNR < 0) \quad (12)$$

Com o aumento da força do sinal ($RSSI > -100dBm$), e no caso de se obter um valor positivo de SNR, a expressão vem da seguinte forma:

$$RSSI\ [dBm] = -157 + \frac{16}{15} * PacketRssi\ (HF\ port) \quad (13)$$

$$RSSI\ [dBm] = -164 + \frac{16}{15} * PacketRssi\ (LF\ port) \quad (14)$$

4.2.14. Implementação do End Device

O ED é composto pelo Arduino Uno e pelo acelerómetro ADXL345, mencionados acima, e um *shield* com dois módulos: SX1276, módulo para suportar comunicações LoRa, e L80-M39, módulo GPS. Um *shield* é uma placa de expansão para o Arduino, que encaixa em cima deste sem necessidade de fios adicionais.

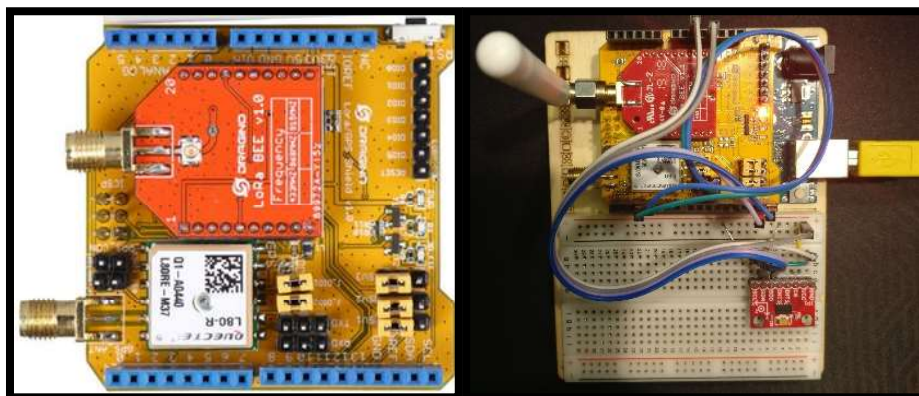


Figura 37 – Shield de LoRa/GPS (esquerda) e circuito prático do ED (direita) [34]

No entanto, para conseguir imprimir os resultados, é necessário criar um terminal em *software*, pois o Arduino apenas tem um terminal embutido. Para isso é necessário ligar um fio da junção RX para o pino D3 e outro fio da junção TX para o pino D4. Os produtores destes equipamentos fornecem também algumas bibliotecas com funções específicas. Para a ligação ponto-a-ponto foi utilizada a biblioteca da RadioHead que incorpora algumas funções de comunicação LoRa, para o IDE do Arduino [Anexo 7].

A adição de um módulo de GPS, embora tenha custos energéticos adicionais, permite que sejam conhecidas as coordenadas físicas de localização de cada ED, no

momento de instalação e, no caso de um impacto, possam ser requeridas, novamente, essas mesmas coordenadas, de modo a facilitar a localização do rail que sofreu o impacto.

Esta versão do dispositivo final está descrita no fluxograma da figura 38.

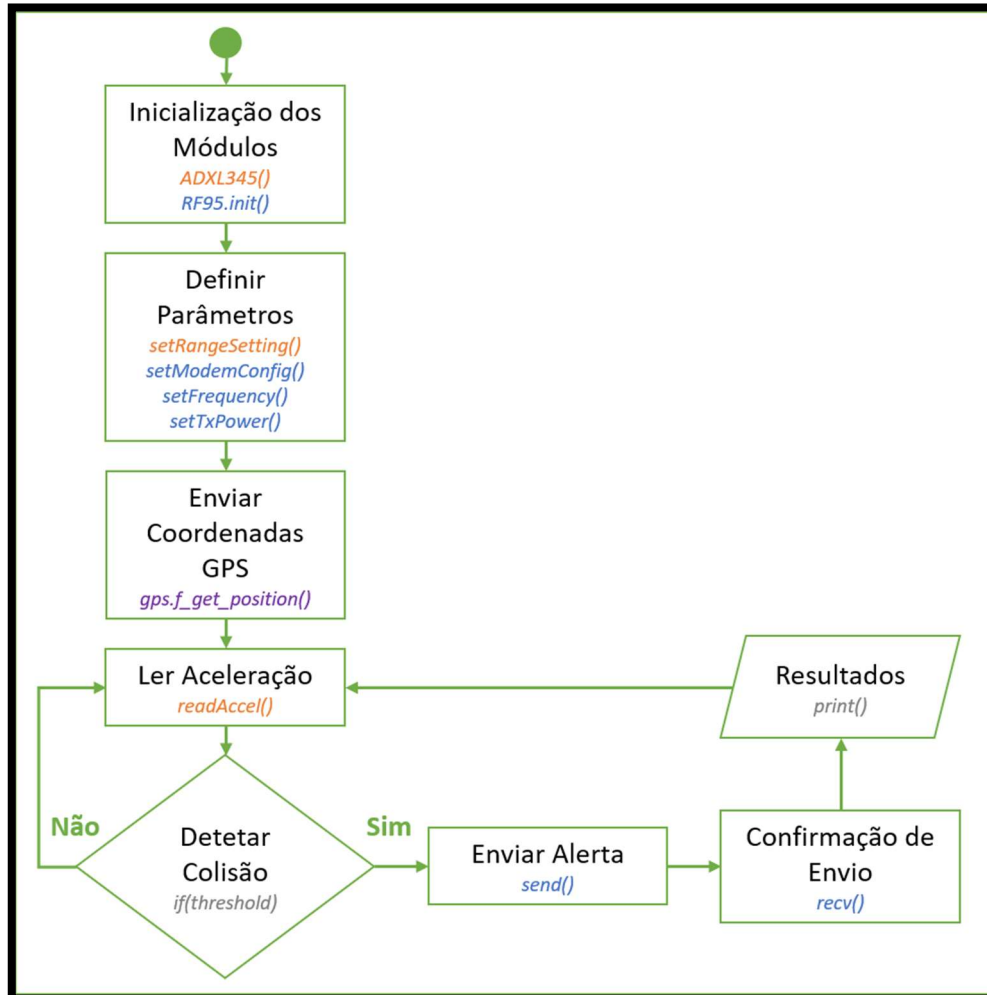


Figura 38 – Fluxograma do dispositivo final (ED)

4.2.15. Implementação da *Gateway*

A *gateway* (ou ponto de acesso, AP) é composta por um Arduino Nano e por uma placa Grove que incorpora o módulo RFM95W. O microprocessador Nano apresenta características semelhantes ao Uno embora não possuía as mesmas saídas de corrente nos seus pinos (requer 40 mA).

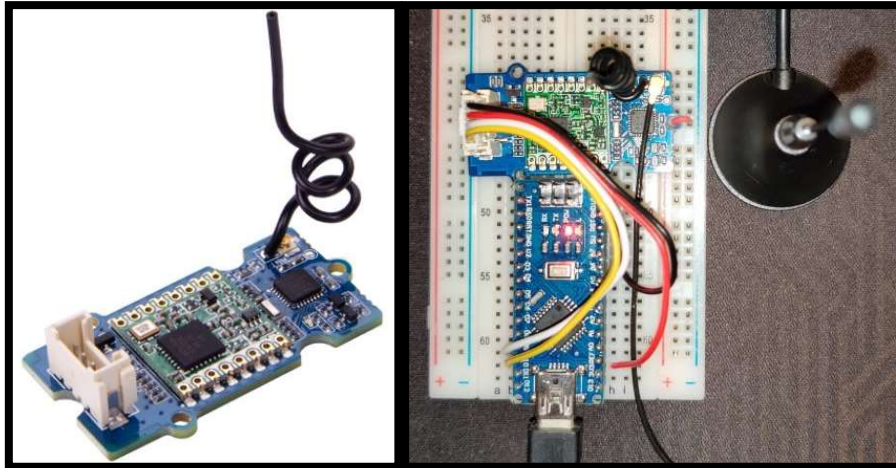


Figura 39 – Placa com módulo RFM95W (esquerda) e circuito prático do AP (direita) [35]

A gateway segue o fluxograma da figura 40, de forma a gerir as comunicações que lhe são enviadas e tentando enviar um sinal de confirmação.

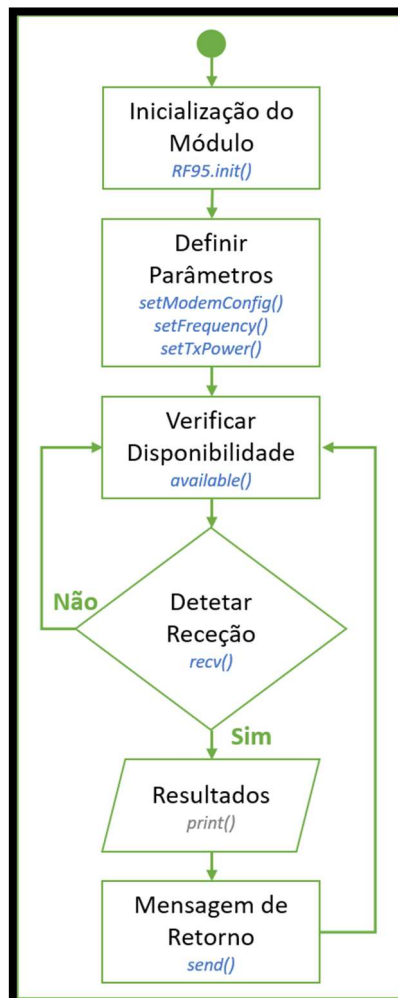


Figura 40 – Fluxograma da gateway (ponto de acesso, AP)

5. Testes e Resultados

Neste ponto são exibidos os testes e os resultados obtidos para a ligação ponto-a-ponto implementada.

5.1. Montagem dos Equipamentos

De modo a realizar alguns testes que comprovem o conceito exposto neste trabalho, os dispositivos utilizados foram ligados segundo a orientação da figura 41.

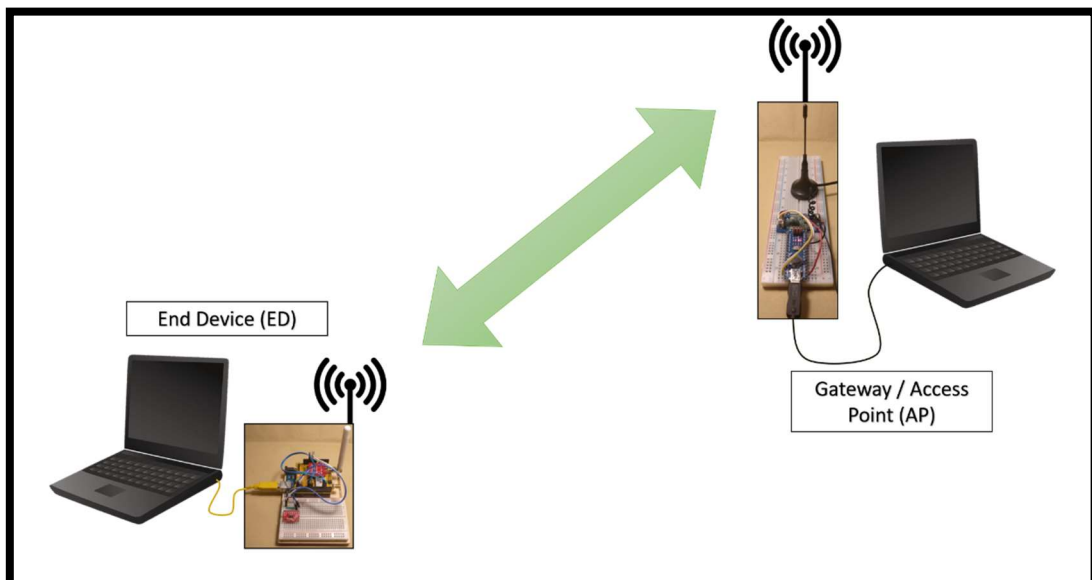


Figura 41 – Esquema da montagem utilizada para realização de testes práticos

A tabela 9 apresenta a descrição de todo o equipamento utilizado.

<i>Hardware</i>	Dispositivos	Modelo	Função
<i>End Device</i>	Arduino	Uno	Microprocessador
	<i>Shield</i> LoRa / GPS (Draguino)	SX1276 / L80-M39	Transmissão e recepção de dados; Aquisição de coordenadas de localização
	Acelerómetro (Sparkfun)	ADXL345	Leitura de dados de aceleração
	Computador	-	Monitorização do terminal; Visualização de resultados
<i>Gateway</i>	Arduino	Nano	Microprocessador
	Módulo LoRa (Grove)	RFM95W	Transmissão e recepção de dados
	Computador	-	Monitorização do terminal; Visualização de resultados

Tabela 9 – Lista dos equipamentos utilizados nos testes práticos

Através destes dados, pode verificar-se que um ED é composto por: uma unidade de processamento (Arduino Uno), uma unidade de comunicação (*shield* LoRa/GPS), uma unidade de sensor (acelerómetro) e uma unidade de alimentação. Esta última vem na forma de um computador que serve, ao mesmo tempo, de terminal da interface para configurar os parâmetros e visualizar os resultados. A *gateway* é composta por: uma unidade de processamento (Arduino Nano), uma unidade de comunicação (módulo LoRa) e uma unidade de alimentação. Também neste caso, esta última unidade é representada por um computador que, além de fornecer energia ao circuito, serve para alterar as configurações e visualizar os respetivos resultados.

The image shows two side-by-side screenshots of a serial terminal window. The left window shows a sequence of received data from an End Device (ED) and the gateway's replies. The data includes RSSI and SNR values, 'Received: Acc', 'Sent Reply', and 'Sample N°16', 'Sample N°17', and 'Sample N°18'. The right window shows the gateway's perspective, including 'Message Received' events, RSSI and SNR values, and '0, 0, 0' data points.

```

COM4
RSSI:-126
SNR:-4
Received: Acc
Sent Reply
Sample N°16
#####
RSSI:-126
SNR:-4
Received: Acc
Sent Reply
Sample N°17
#####
RSSI:-127
SNR:-4
Received: Acc
Sent Reply
Sample N°18
#####
RSSI:-127
SNR:-5
Received: Acc
Sent Reply
Sample N°19
#####

COM4
RSSI:-130
SNR:-13
Message Received
#####
0, 0, 0
Acc
RSSI:-130
SNR:-17
Message Received
#####
0, 0, 0
Acc
RSSI:-130
SNR:-16
Message Received
#####
0, 0, 0
Acc
RSSI:-130
SNR:-13
Message Received

```

Figura 42 – Exemplo de teste de comunicação de dados e dos respetivos valores de RSSI e SNR

5.2. Calibração do Acelerómetro

A primeira fase de testes teve início com a configuração do sensor ADXL345, a nível das conexões e dos valores de saída de aceleração. Após efetuadas as ligações descritas na secção anterior, foi necessário um processo de calibração, de forma a obter valores realistas de aceleração.

Um método de calibração preciso utiliza 2 pontos por eixo, ou seja, num sensor de 3 eixos existem 6 pontos de interesse. Através de um algoritmo que recolhe os valores máximos e mínimos, é possível calcular os valores de desvio e os fatores de ganho dados pelas leituras obtidas. As seguintes expressões são usadas para calcular os valores de desvio e de ganho do sensor [36]:

$$A_{OFF} [g] = 0.5 * (A_{+1g} + A_{-1g}) \quad (15)$$

$$Gain = 0.5 * \left(\frac{A_{+1g} - A_{-1g}}{1g} \right) \quad (16)$$

Ao medir os valores de aceleração para as posições referenciadas, pode-se calcular os valores de desvio e ganho e, assim, ficar com o sensor calibrado. A tabela 10 apresenta os resultados das leituras obtidas e as correções efetuadas no desvio e no ganho. Para posições estáticas, o sensor apresenta os resultados demonstrados na figura 43.

Eixos	+1 g	-1 g	Desvio (<i>Offset</i>)	Ganho (<i>Gain</i>)
X	33	-31	1.0	32.0
Y	33	-32	0.5	32.5
Z	31	-33	-1.0	32.0

Tabela 10 – Valores de calibração do sensor ADXL345

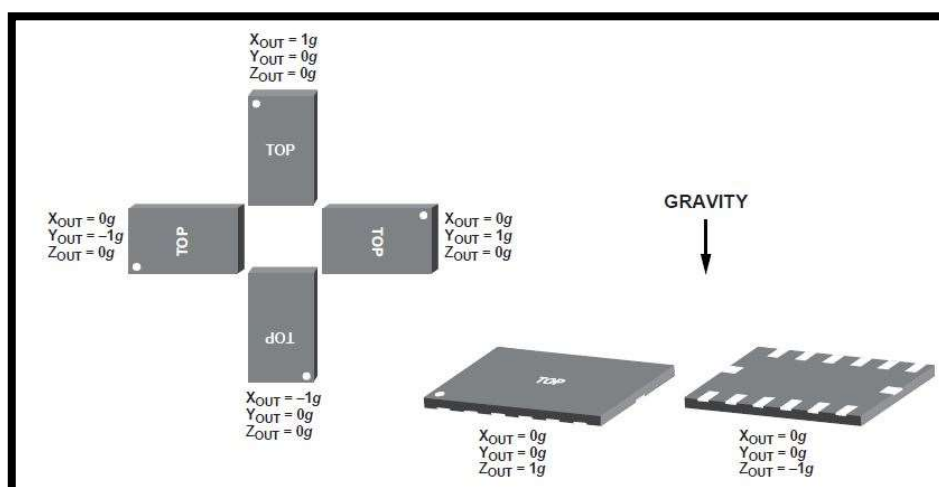


Figura 43 – Calibração do acelerómetro ADXL345 [27]

5.3. Teste de GPS

Com o acelerómetro configurado, incorporou-se o *shield* de LoRa/GPS com o restante equipamento do ED. Antes que fossem testadas as comunicações, procedeu-se ao ajuste do sensor de GPS para a obtenção de valores precisos. Como o objetivo passa mais pelo conhecimento dos valores de aceleração e pelas comunicações efetuadas, apenas foi abordada uma parte simplificada do sistema de GPS, de forma a obter um valor de coordenadas para incorporar na mensagem inicial de instalação.

O L80-M39, módulo de GPS utilizado, apenas funciona em ambientes exteriores, pelo que, dentro de edifícios não consegue obter quaisquer valores. Nos ambientes exteriores testados, os resultados encontram-se sempre com um erro inferior a 10 m. Este erro não apresenta assim um desvio considerável e pode ser incorporado no programa. Na figura 44 encontra-se um exemplo da obtenção dos valores de latitude e longitude, bem como do número de satélites e do *horizontal dilution of precision* (HDOP), uma característica da navegação por satélite que especifica o erro de propagação.

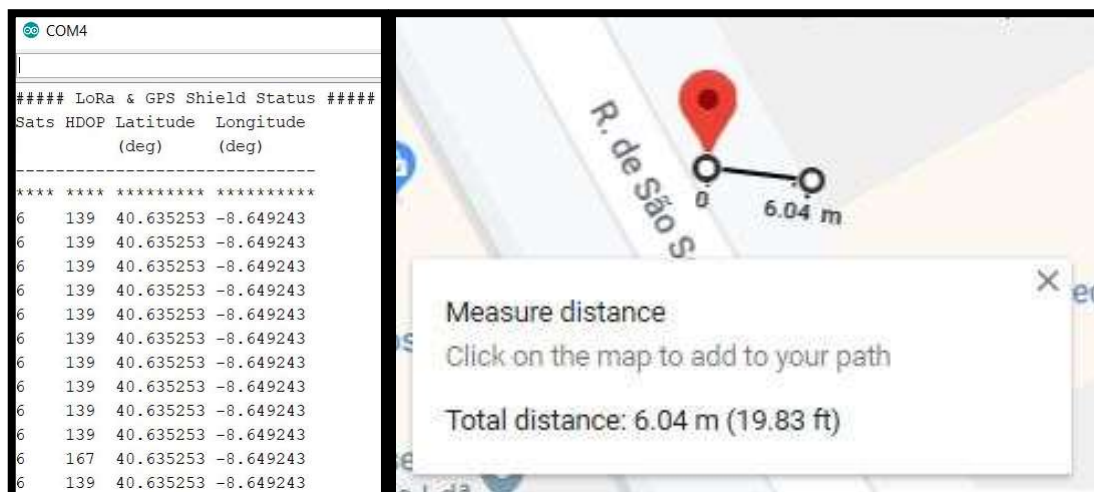


Figura 44 – Dados do sensor de GPS (esquerda) e distância de erro entre valor real e valor obtido (direita)

5.4. Configurações

A parte que se segue diz respeito às configurações que foram necessárias estabelecer para obter os melhores valores para esta aplicação. Ao fazer variar os parâmetros ajustáveis do fator de dispersão (SF), da taxa de codificação (CR) e da largura de banda (BW), obteve-se um total de 16 configurações que vão de encontro à intenção de obter os melhores dados de comunicação possíveis. Como para longas distâncias interessa um SF maior, os valores utilizados foram: SF12, SF11, SF10 e SF7 (este último como teste de controlo). Em termos de CR, optou-se por utilizar as duas extremidades da escala, ou seja, codificação de 4/5 e de 4/8. Embora o sensor LoRa possa suportar frequências baixas, sem um oscilador externo, apenas se consegue variar a frequência nas escalas mais altas e,

por isso, as bandas testadas foram as de 62.5 kHz e 125 kHz.

Após a consulta dos registos necessários a alterar e das fórmulas expressas na secção da estrutura do pacote LoRa, calculou-se as respetivas configurações, juntamente com os tempos no ar de cada uma delas. Este valor representa o tempo de espera para poder enviar uma segunda mensagem, respeitando assim a lei do *duty-cycle* de 1%.

O último parâmetro escolhido foi a potência do transmissor. Por lei, apenas se pode transmitir 14 dBm, pelo que foi essa a potência escolhida. No entanto, após alguns testes, a *gateway* não possui corrente suficiente para esta potência, devido ao Arduino Nano, pelo que foi escolhida uma potência de transmissão de 8 dBm na *gateway*, para as mensagens de confirmação de receção.

Na tabela 11 estão representados todos os resultados destes cálculos, com as características descritas e com um tamanho de *payload* de 5 bytes, pois a mensagem a transmitir é de “Acc”, correspondente a acidente detetado.

Config. N°	SF [2 ^{SF}]	CR	BW (kHz)	Descrição	Tempo no Ar (s)
1	7 [128]	4/5	62,5	Bw62_5Cr45Sf128	9
2			125	Bw125Cr45Sf128	5
3		4/8	62,5	Bw62_5Cr48Sf128	11
4			125	Bw125Cr48Sf128	6
5	10 [1024]	4/5	62,5	Bw62_5Cr45Sf1024	50
6			125	Bw125Cr45Sf1024	25
7		4/8	62,5	Bw62_5Cr48Sf1024	59
8			125	Bw125Cr48Sf1024	30
9	11 [2048]	4/5	62,5	Bw62_5Cr45Sf2048	99
10			125	Bw125Cr45Sf2048	50
11		4/8	62,5	Bw62_5Cr48Sf2048	118
12			125	Bw125Cr48Sf2048	59
13	12 [4096]	4/5	62,5	Bw62_5Cr45Sf4096	197
14			125	Bw125Cr45Sf4096	99
15		4/8	62,5	Bw62_5Cr48Sf4096	236
16			125	Bw125Cr48Sf4096	118

Tabela 11 – Configurações da comunicação LoRa

Com os valores calculados, foram realizados vários testes, tendo obtido resultados para as distâncias de 1, 3 e 9 km, sendo que o primeiro teste foi efetuado numa zona urbana e os outros dois em zonas rurais com linha de vista.

Após a devida calibração dos equipamentos, os testes principais têm como objetivo avaliar as comunicações de longa distância, pelos parâmetros de avaliação do recetor, ou seja, RSSI e SNR. Cada um dos testes elaborados seguiu a montagem da figura 41.

5.5. Teste Urbano (1 km)

Este teste foi produzido numa zona urbana com uma grande abundância de prédios, estando a *gateway* colocada num ponto mais alto (6º andar de um prédio) e o ED ao nível do solo. A distância entre os dispositivos é de 1040 m.

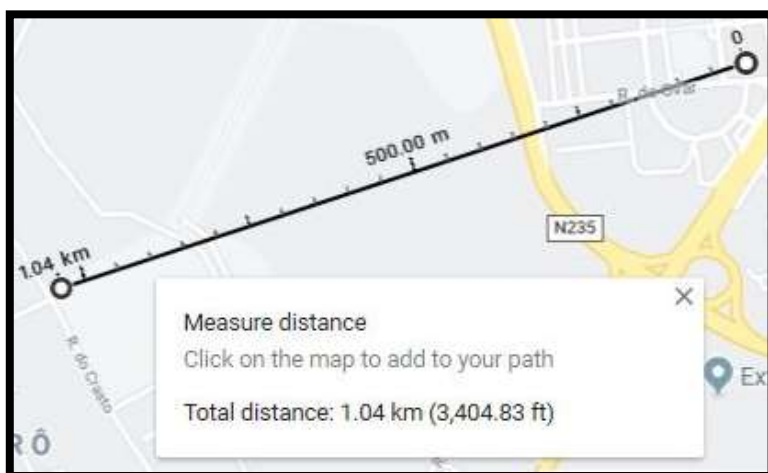


Figura 45 – Distância do teste urbano de 1 km

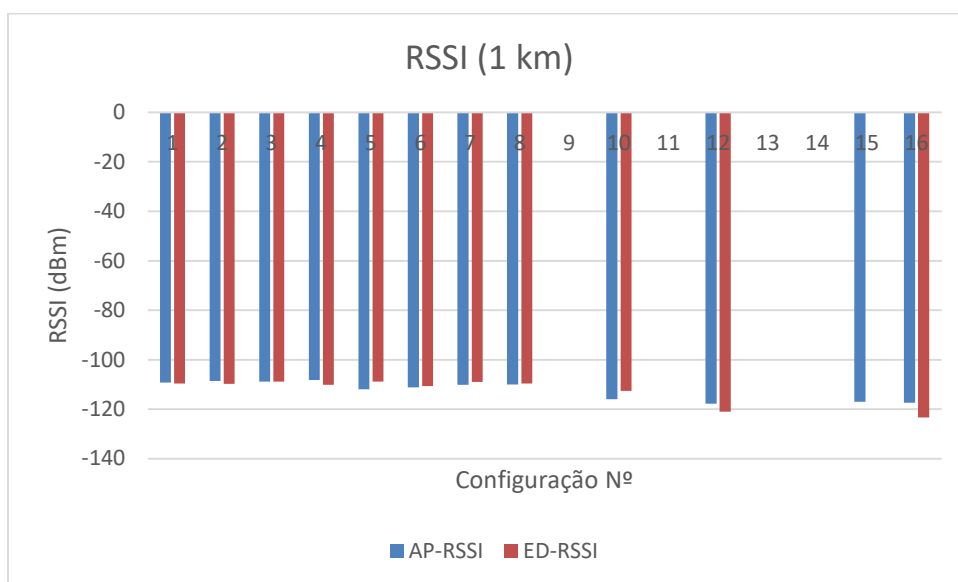


Figura 46 – Valores de RSSI para teste de 1 km

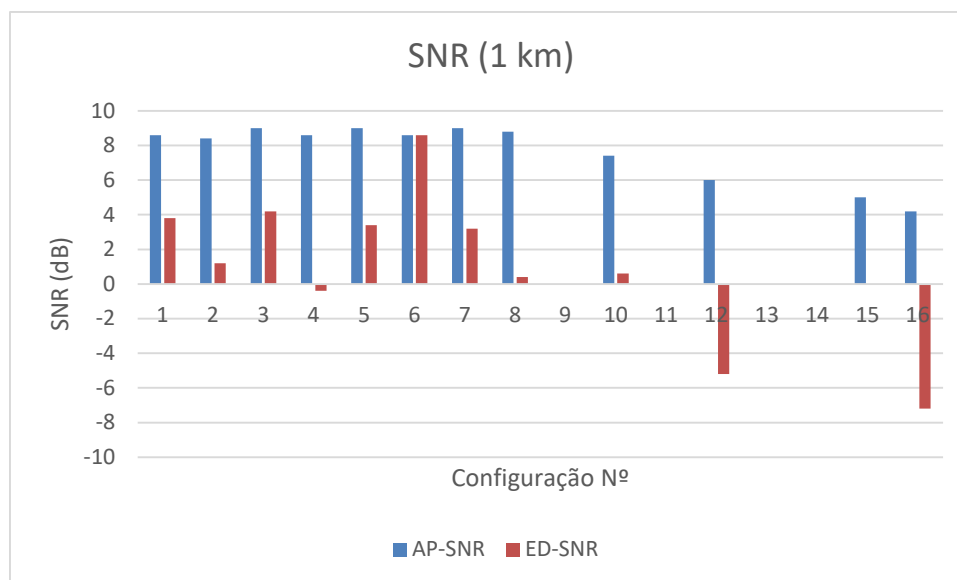


Figura 47 – Valores de SNR para teste de 1 km

Na tabela 12 encontram-se os valores do desvio padrão relativo e da taxa de sucesso da comunicação.

Config. N°	Desvio Padrão Relativo do RSSI (%)	Desvio Padrão Relativo do SNR (%)	Taxa de Envio (%)
1	0.41	6.37	100
2	0.50	6.52	100
3	0.41	0.00	100
4	0.41	6.37	100
5	0.00	0.00	100
6	0.40	6.37	100
7	0.41	0.00	100
8	0.00	5.08	100
9	-	-	0
10	0.00	12.09	100
11	-	-	0
12	0.38	0.00	100
13	-	-	0
14	-	-	0
15	1.21	0.00	40
16	0.47	10.65	100

Tabela 12 – Desvio padrão relativo do RSSI e SNR e taxa de envio (1 km)

Para este teste, a potência inserida no ED foi superior aos 14 dBm, neste caso 18 dBm, com o intuito de verificar a influência da potência na transmissão. Os resultados do RSSI encontram-se dentro do esperado pois diminuem com o aumento do SF. Embora seja um sinal fraco, devido à grande densidade urbana, consegue ser recebido pelo recetor e este transmite a resposta a essa receção. Ao aumentar o SF, a quantidade de bits diminui e

algumas configurações não chegam ao recetor, nomeadamente as que possuem a taxa de codificação de 4/5. O facto de haver alguns sinais apenas do lado do AP é justificado pela falta de potência da *gateway* para transmitir um sinal de volta, pelo que apenas consegue receber em alguns casos. Além disso, os valores de SNR variam bastante devido à potência ser superior a 14 dBm. Os valores de desvio padrão apenas dizem respeito à parte da receção pela *gateway*. No geral, para as configurações que obtiveram resultados, as taxas de envio apresenta-se satisfatórias, ou seja, os dados enviados chegaram quase sempre ao destino, nessas configurações.

5.6. Teste Rural (3 km)

Recorrendo a uma zona mais rural, foi novamente testado o sistema para uma distância de 3110 m, sendo que a *gateway* encontra-se num prédio (4º andar) e o ED numa linha de vista quase horizontal.

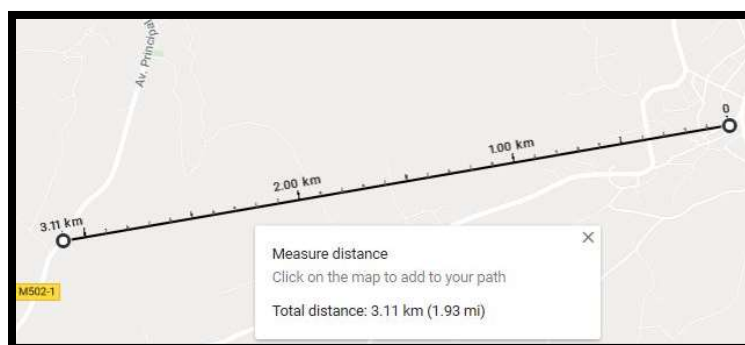


Figura 48 – Distância do teste rural de 3 km

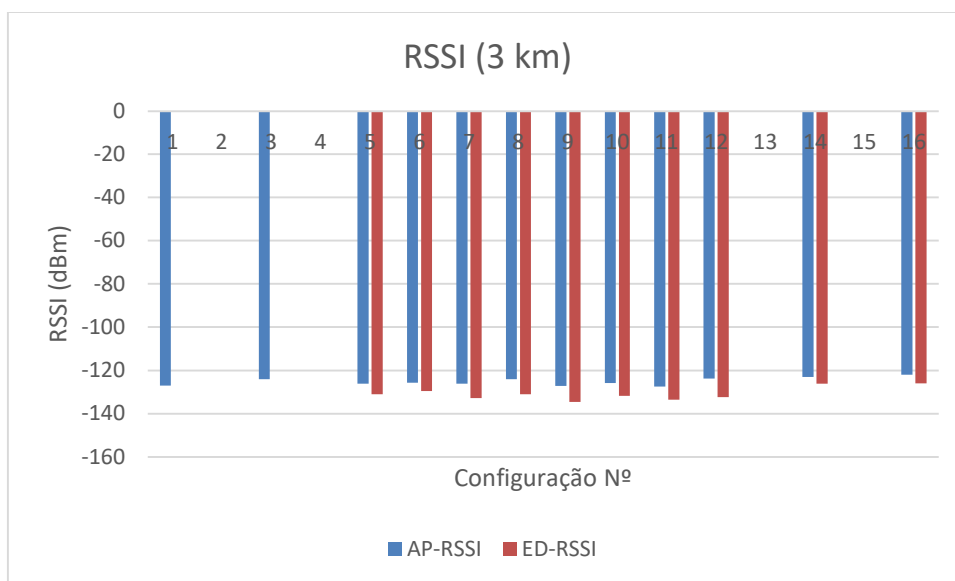


Figura 49 - Valores de RSSI para teste de 3 km

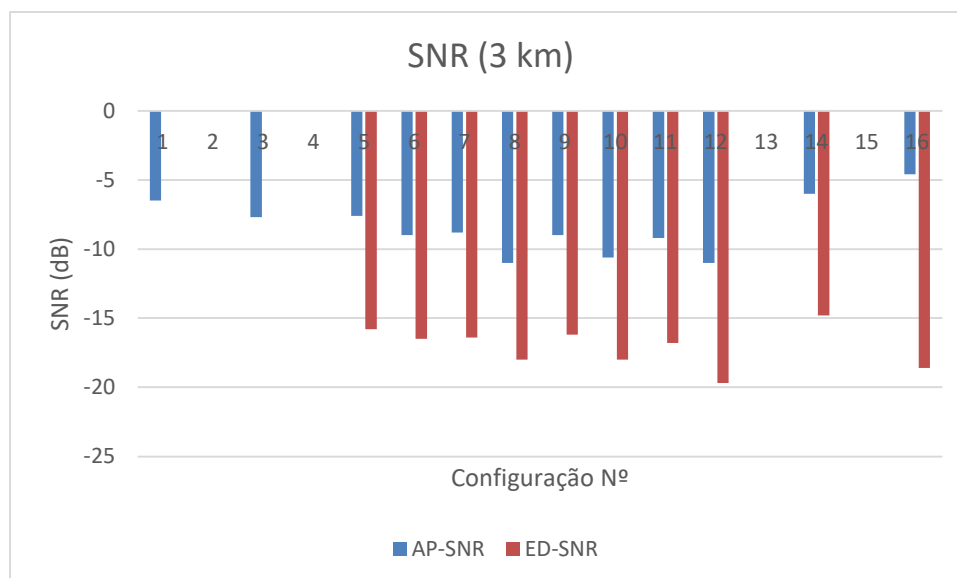


Figura 50 - Valores de SNR para teste de 3 km

Na tabela 13 encontram-se os valores do desvio padrão relativo e da taxa de sucesso da comunicação, para este teste.

Config. Nº	Desvio Padrão Relativo do RSSI (%)	Desvio Padrão Relativo do SNR (%)	Taxa de Envio (%)
1	0.00	10.88	40
2	-	-	0
3	2.13	7.50	60
4	-	-	0
5	1.18	7.21	100
6	0.46	0.00	60
7	1.72	16.85	100
8	0.00	19.64	80
9	0.66	17.57	100
10	0.67	5.17	100
11	0.43	9.09	100
12	0.36	14.37	100
13	-	-	0
14	1.72	35.36	100
15	-	-	0
16	0.82	32.97	100

Tabela 13 - Desvio padrão relativo do RSSI e SNR e taxa de envio (3 km)

Neste teste, os resultados do RSSI estão distribuídos ao longo da zona de -120 dBm. Os valores do SNR encontram-se na escala esperada e tendem a aumentar com o SF. Embora tenha havido chuva e nevoeiro durante este teste, a comunicação LoRa apresenta bons níveis de imunidade a interferências. Tendo em conta estes fatores, foram obtidos valores satisfatórios para a maioria das configurações, sendo que é de esperar algumas

falhas para o SF7 e um funcionamento linear no restante intervalo do fator de dispersão. Apenas no SF12, para uma baixa largura de banda, a configuração com a taxa de codificação 4/5 não é recebida pois, com este fator de dispersão, os bits transmitidos são bastante reduzidos, e uma fraca codificação pode não chegar para “traduzir” a mensagem.

5.7. Teste Rural (9 km)

Por último, e recorrendo a uma área rural montanhosa para tentar executar este teste com linha de vista, foi testado o sistema para uma distância de 8940 m.



Figura 51 - Distância do teste rural de 9 km

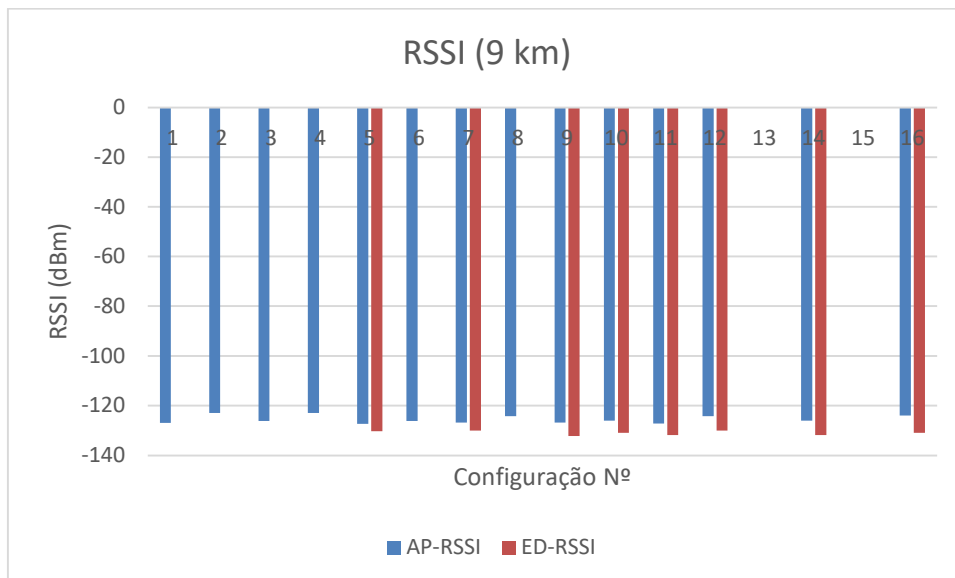


Figura 52 - Valores de RSSI para teste de 9 km

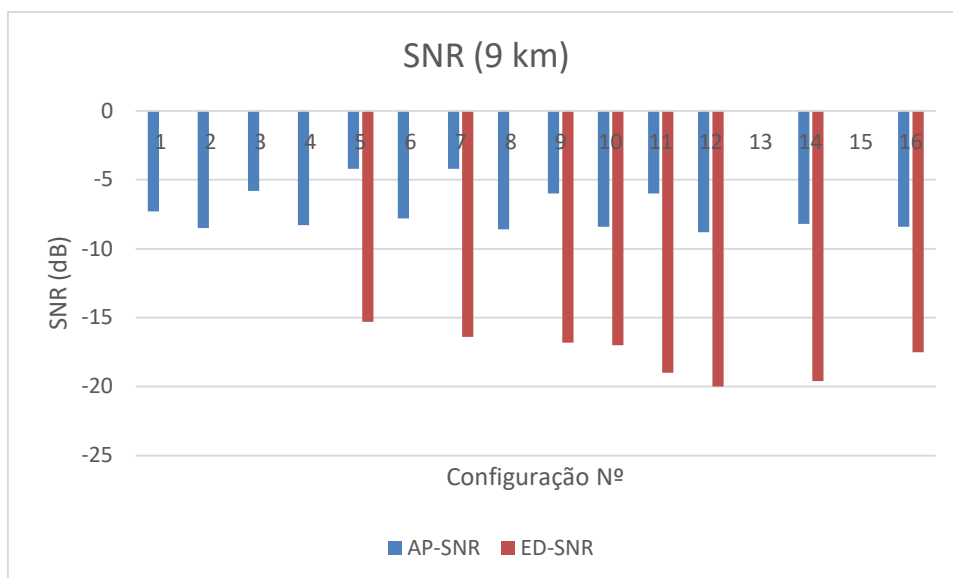


Figura 53 - Valores de SNR para teste de 9 km

Na tabela 14 encontram-se os valores do desvio padrão relativo e da taxa de sucesso da comunicação.

Config. N°	Desvio Padrão Relativo do RSSI (%)	Desvio Padrão Relativo do SNR (%)	Taxa de Envio (%)
1	0.00	10.88	40
2	-	-	0
3	2.13	7.50	60
4	-	-	0
5	1.18	7.21	100
6	0.46	0.00	60
7	1.72	16.85	100
8	0.00	19.64	80
9	0.66	17.57	100
10	0.67	5.17	100
11	0.43	9.09	100
12	0.36	14.37	100
13	-	-	0
14	1.72	35.36	100
15	-	-	0
16	0.82	32.97	100

Tabela 14 - Desvio padrão relativo do RSSI e SNR e taxa de envio (9 km)

Para este último teste, esquematizaram-se comunicações a distâncias consideráveis. Os valores de RSSI continuam constante numa zona de -120 dBm e o aparecimento de dados apenas do lado do AP está relacionado com a fraca potência que este tem para transmitir sinais de confirmação. Por outro lado, o SNR comporta-se como esperado, diminuindo com o aumento do SF.

5.8. Análise dos Testes Realizados

Com os dados obtidos foi necessário comparar os valores experimentais com os valores típicos expressos pelo fabricante [Anexo 5]. Estes valores estão resumidos na tabela 15, para os casos estudados.

Frequência (kHz)	Spreading Factor	Sensibilidade (dBm)
62.5	7	-128
	10	-135
	11	-137
	12	-140
125	7	-125
	10	-134
	11	-136
	12	-137

Tabela 15 – Valores típicos de sensibilidade [31]

Aplicando a diferença entre o valor de RSSI e o valor típico obtém-se a margem de sensibilidade presente nas figuras 54 e 55, para os testes de 3 km e 9 km, respectivamente.

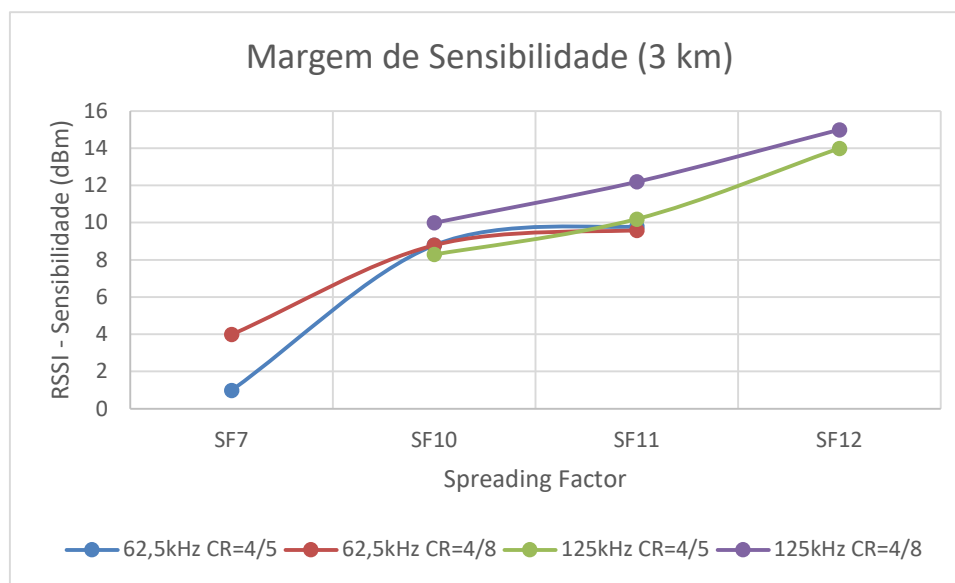


Figura 54 - Margem de sensibilidade para teste de 3 km

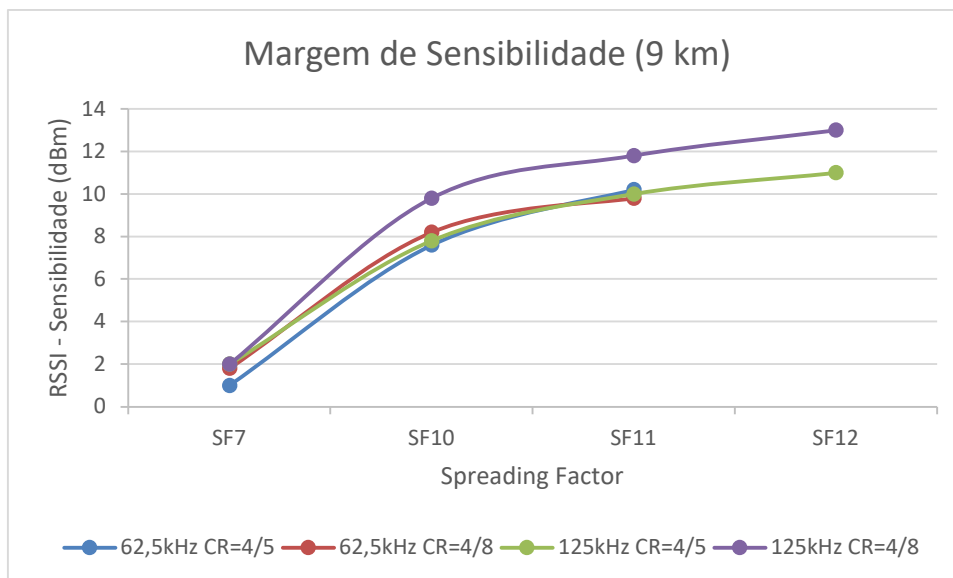


Figura 55 - Margem de sensibilidade para teste de 9 km

Com o aumento do SF a margem também aumenta, o que significa que o sinal enviado apresenta características que conseguem ser bem identificadas pelo recetor. Também se pode notar que, com o aumento da distância, esta margem vai diminuindo, sendo que, ao tender para valores menores, irão começar a existir mais falhas e uma consequente perda de sinais.

Deste modo, a informação que se pretende enviar deve utilizar a configuração que forneça a maior margem possível. Visto que existem falhas na transmissão de 62.5 kHz com SF12, as configurações que podem ser escolhidas são SF12 a 125 kHz ou SF11 em ambas as larguras de banda.

Em termos do SNR, e segundo os dados apresentados na secção do *spreading factor* (tabela 5), estes valores, para os últimos testes, estão abaixo do limite do desmodulador LoRa.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Os sistemas MEMS representam uma tecnologia fundamental na microeletrónica do presente e, juntamente com a nanotecnologia, um possível avançado para o futuro desta área. Este tipo de acelerómetros são muitas vezes utilizados em tarefas quotidianas (por exemplo, proteção de discos rígidos, transporte de encomendas e sistemas de segurança) mas possuem características bastante importante para projetos como este: baixo custo, baixa potência e fácil integração e implementação.

As redes LPWAN revelam-se essenciais para trabalhos que necessitem de vários aspetos como longo alcance, baixo consumo energético, escalabilidade, implementação acessível e custos reduzidos. Ao estarem inseridas numa zona de ação diferente das redes móveis e das redes de curta distância, desempenham um grande papel no futuro do IoT, que pretende a interligação de biliões de dispositivos nos próximos anos. Esta ação apenas será possível com tecnologias capazes de suportar estes números, ao mesmo tempo que mantêm a sua integridade e o funcionamento contínuo dos sistemas implementados. O LoRa destaca-se no meio destas redes pela sua capacidade de implementação, a juntar ao equilíbrio geral de todas as outras características. Numa visão mais aprofundada a esta tecnologia, é possível verificar uma modulação proprietária de dispersão do espetro aliada a um conjunto de parâmetros ajustáveis que possibilitam a adaptação a diversas aplicações.

Os ITS pretendem integrar vários sistemas inteligentes para aumentar o conhecimento e a segurança de vários tipos de transportes, incluindo o rodoviário. Para isso, as WSNs podem representar um papel importante para a segurança rodoviária. A sua implementação em rails facilita a deteção de possíveis impactos e a respetiva manutenção em caso de necessidade. A sensorização destes elementos possibilita que esta deteção seja feita de uma forma mais rápida, assegurando a integridade da rede metálica.

A junção de um sensor MEMS capacitivo com um módulo de comunicação LoRa, associados a um microprocessador, permitiu criar um dispositivo que representa o início do sistema global de deteção de colisões. Este sistema é estendido desde o dispositivo final, passando por uma *gateway*, até ao servidor e à respetiva aplicação.

Este trabalho realizou a implementação de uma parte desta rede, uma ligação

ponto-a-ponto entre um dispositivo final (ED) e uma *gateway* (AP). Com a manipulação dos parâmetros certos foi possível criar uma ligação capaz de comunicar a 9 km de distância, com bastante potencial para conseguir ir mais longe. Ao ajustar os valores de dispersão de espectro, taxa de codificação e largura de banda conseguiu-se criar uma tabela de configurações que ajudaram a compreender as características desta rede. Para comunicações mais longas, com uma baixa taxa de dados, devemos privilegiar o aumento do fator de dispersão e a diminuição da largura de banda. Embora tenham sido registadas algumas falhas nas configurações de SF12 a 62.5 kHz, são recomendadas as configurações de SF12 a 125 kHz e de SF11 em ambas as larguras de banda. Todas estas apresentam margens de cerca de 10 dBm, tendo em conta os valores de RSSI e a respetiva sensibilidade.

Como trabalho futuro para este projeto sugeria a implementação de um sistema com microprocessadores dedicados, que possam garantir baixos consumos energéticos, para assim começar a implementar uma rede com algumas dezenas de aparelhos, com um baixo custo. Visto que apenas é necessário detetar o impacto num rail, o acelerómetro ADXL345 consegue averiguar a ocorrência de qualquer colisão com estas estruturas. No entanto, caso se pretenda desenvolver um dispositivo capaz de interpretar cada colisão, em termos de necessidade de manutenção, o acelerómetro terá de ser substituído por um que abranja um intervalo de medição com cerca de 200 g. Numa última fase será também importante verificar possíveis métodos de *energy harvesting*, de modo a tornar esta WSN o mais autónoma possível.

Referências

- 1] Infraestruturas de Portugal, “Rede Rodoviária,” [Online]. Available: <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/rede/rodoviaria>. [Acedido em 2 Outubro 2019].
- 2] ANSR, “Relatório Anual de Sinistralidade Rodoviária,” 2018.
- 3] TE Connectivity, “Types of Sensors,” [Online]. Available: <https://www.te.com/usa-en/products/sensors.html>. [Acedido em 22 Fevereiro 2019].
- 4] Mouser, “Sensores,” [Online]. Available: https://pt.mouser.com/Sensors/_/N-5gej. [Acedido em 8 Maio 2019].
- 5] Engineering 360, “Shock and Impact Sensors Information,” [Online]. Available: https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/acceleration_vibration_sensing/shock_impact_sensors. [Acedido em 29 Outubro 2019].
- 6] Embarcados, “Sensores Inerciais,” [Online]. Available: <https://www.embarcados.com.br/sensores-inerciais-parte-1/>. [Acedido em 28 Outubro 2019].
- 7] Dimension Engineering, “A Beginner’s Guide to Accelerometers,” [Online]. Available: <https://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>. [Acedido em 26 Outubro 2019].
- 8] Endaq, “Accelerometers: Taking the Guesswork out of Accelerometer

- Selection,” [Online]. Available: <https://blog.endaq.com/accelerometer-selection>. [Acedido em 21 Outubro 2019].
- 9] Embarcados, “MEMS - Sistemas Microeletromecânicos,” [Online]. Available: <https://www.embarcados.com.br/mems/>. [Acedido em 28 Outubro 2019].
- 10] MEMS & Nanotechnology Exchange, “What is MEMS Technology?,” [Online]. Available: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>. [Acedido em 23 Outubro 2019].
- 11] How to Mechatronics, “MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer & Arduino,” [Online]. Available: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>. [Acedido em 30 Outubro 2019].
- 12] TE Connectivity, “Sensors for Test & Measurement,” [Online]. Available: <https://www.te.com/usa-en/campaigns/corporate/what-a-sensor-sees/what-a-sensor-sees-in-tm.html>. [Acedido em 18 Outubro 2019].
- 13] Endaq, “Accelerometer Specifications: Deciphering Accelerometer's Datasheet,” [Online]. Available: <https://blog.endaq.com/accelerometer-specifications-decoding-a-datasheet>. [Acedido em 21 Outubro 2019].
- 14] Sparkfun, “Accelerometer Basics,” [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/accelerometer-basics/all>. [Acedido em 15 Março 2019].
- 15] Mekki, Kais; Bajic, Eddy; Chaxel, Frederic; Meyer, Fernand, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, pp. 1-7, 2019.
- 16] Sigfox, “Coverage,” [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en/coverage>. [Acedido em 25 Outubro 2019].
- 17] LoRa Alliance, “LoRaWAN Coverage,” [Online]. Available: <https://loralliance.org/lorawan-coverage>. [Acedido em 25 Outubro 2019].
- 18] GSA, “NB-IoT and LTE_MTC Global Ecosystem and Market Status,” [Online]. Available: <https://gsacom.com/paper/nb-iot-and-lte-mtc-global-ecosystem-and-market-status/>. [Acedido em 30 Outubro 2019].

- 19] Sigfox, “Sigfox Technology Overview,” [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview>. [Acedido em 26 Outubro 2019].
- 20] Mobilefish, “LoRaWAN,” [Online]. Available: https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html. [Acedido em 10 Setembro 2019].
- 21] Technical Marketing Workgroup, “A technical overview of LoRa and LoRaWAN,” pp. 1-20.
- 22] ITS Portugal, “Intelligent Transport Systems & Services,” [Online]. Available: <https://www.its-portugal.com/its>. [Acedido em 11 Outubro 2019].
- 23] Matin, M.A.; Islam, M.M., “Overview of Wireless Sensor Network,” pp. 1-23, 6 Setembro 2012.
- 24] Tiwari, Prashant; Mishra, Raj; Saxena, Varun; Bhavsar, Devendra, “Wireless Sensor Networks: Introduction, Advantages, Applications and Research Challenges,” *International Journal of Technology Innovations and Research*, pp. 1-12, 2015.
- 25] Miranda, J.; Gomes, T.; Abrishambaf, R.; Loureiro, F.; Mendes, J.; Cabral, J.; Monteiro, J., *A Wireless Sensor Network for Collision Detection on Guardrails*, pp. 1-6, 2014.
- 26] The Things Network, “LoRaWAN,” [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/>. [Acedido em 26 Setembro 2019].
- 27] Analog Devices, “Datasheet ADXL345,” 2015.
- 28] Sparkfun, “I2C,” [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>. [Acedido em 25 Março 2019].
- 29] Sparkfun, “ADXL345 Hookup Guide,” [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/adxl345-hookup-guide#example-code>. [Acedido em 15 Fevereiro 2019].
- 30] Arduino, “Arduino Uno Rev3,” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. [Acedido em 25 Outubro 2019].

- 31] Semtech, “Datasheet SX1276/77/78/79,” [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>. [Acedido em 20 Abril 2019].
- 32] ANACOM, “Isenção de Licença de Estação,” 2018.
- 33] Nanotron, “Chirp Spread Spectrum (CSS),” [Online]. Available: https://nanotron.com/EN/co_techn-css-php/. [Acedido em 24 Outubro 2019].
- 34] Dragino, “Lora/GPS Shield,” [Online]. Available: http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora/GPS_Shield. [Acedido em 25 Setembro 2019].
- 35] Seeed, “Grove - LoRa Radio,” [Online]. Available: http://wiki.seeedstudio.com/Grove_LoRa_Radio/. [Acedido em 10 Julho 2019].
- 36] Analog Devices, “Using an Accelerometer for Inclination Sensing,” 2010.

Anexos

Anexo 1 – Especificações do Acelerómetro ADXL345 [27]

SPECIFICATIONS					
$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 2.5\text{ V}$, $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$, acceleration = 0 g, $C_S = 10\ \mu\text{F}$ tantalum, $C_{IO} = 0.1\ \mu\text{F}$, output data rate (ODR) = 800 Hz, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.					
Parameter	Test Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Measurement Range	User selectable		$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$		g
Nonlinearity	Percentage of full scale		± 0.5		%
Inter-Axis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ²			± 1		%
OUTPUT RESOLUTION	Each axis				
All g Ranges	10-bit resolution		10		Bits
$\pm 2\text{ g}$ Range	Full resolution		10		Bits
$\pm 4\text{ g}$ Range	Full resolution		11		Bits
$\pm 8\text{ g}$ Range	Full resolution		12		Bits
$\pm 16\text{ g}$ Range	Full resolution		13		Bits
SENSITIVITY	Each axis				
Sensitivity at $X_{out}, Y_{out}, Z_{out}$	All g-ranges, full resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 2\text{ g}$, 10-bit resolution	230	256	282	LSB/g
	$\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution	115	128	141	LSB/g
	$\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution	57	64	71	LSB/g
	$\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution	29	32	35	LSB/g
Sensitivity Deviation from Ideal	All g-ranges		± 1.0		%
Scale Factor at $X_{out}, Y_{out}, Z_{out}$	All g-ranges, full resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 2\text{ g}$, 10-bit resolution	3.5	3.9	4.3	mg/LSB
	$\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution	7.1	7.8	8.7	mg/LSB
	$\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution	14.1	15.6	17.5	mg/LSB
	$\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution	28.6	31.2	34.5	mg/LSB
Sensitivity Change Due to Temperature			± 0.01		%/°C

0 g OFFSET 0 g Output for Xout, Yout 0 g Output for Zout 0 g Output Deviation from Ideal, Xout, Yout 0 g Output Deviation from Ideal, Zout 0 g Offset vs. Temperature for X-, Y-Axes 0 g Offset vs. Temperature for Z-Axis	Each axis	-150 -250	0 0	+150 +250	mg mg mg mg mg/°C mg/°C
NOISE X-, Y-Axes Z-Axis	ODR = 100 Hz for ±2 g, 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution ODR = 100 Hz for ±2 g, 10-bit resolution or all g-ranges, full resolution		0.75 1.1		LSB rms LSB rms
OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH Output Data Rate (ODR) ^{1,4,5}	User selectable	0.1		3200	Hz
SELF-TEST ⁶ Output Change in X-Axis Output Change in Y-Axis Output Change in Z-Axis		0.20 -2.10 0.30		2.10 -0.20 3.40	g g g
POWER SUPPLY Operating Voltage Range (Vs) Interface Voltage Range (VDDIO) Supply Current Standby Mode Leakage Current Turn-On and Wake-Up Time ⁷	ODR ≥ 100 Hz ODR < 10 Hz ODR = 3200 Hz	2.0 1.7	2.5 1.8	3.6 Vs	V V μA μA μA ms

Anexo 2 – Consumo de Corrente vs. Taxa de Dados (ADXL345) [27]

Output Data Rate (Hz)	Bandwidth (Hz)	Rate Code	I _{DD} (μA)
3200	1600	1111	140
1600	800	1110	90
800	400	1101	140
400	200	1100	140
200	100	1011	140
100	50	1010	140
50	25	1001	90
25	12.5	1000	60
12.5	6.25	0111	50
6.25	3.13	0110	45
3.13	1.56	0101	40
1.56	0.78	0100	34
0.78	0.39	0011	23
0.39	0.20	0010	23
0.20	0.10	0001	23
0.10	0.05	0000	23

Anexo 3 – Mapa de Registos (ADXL345) [27]

Address		Name	Type	Reset Value	Description
Hex	Dec				
0x00	0	DEVID	R	11100101	Device ID
0x01 to 0x1C	1 to 28	Reserved			Reserved; do not access
0x1D	29	THRESH_TAP	R/W	00000000	Tap threshold
0x1E	30	OFSX	R/W	00000000	X-axis offset
0x1F	31	OFSY	R/W	00000000	Y-axis offset
0x20	32	OFSZ	R/W	00000000	Z-axis offset
0x21	33	DUR	R/W	00000000	Tap duration
0x22	34	Latent	R/W	00000000	Tap latency
0x23	35	Window	R/W	00000000	Tap window
0x24	36	THRESH_ACT	R/W	00000000	Activity threshold
0x25	37	THRESH_INACT	R/W	00000000	Inactivity threshold
0x26	38	TIME_INACT	R/W	00000000	Inactivity time
0x27	39	ACT_INACT_CTL	R/W	00000000	Axis enable control for activity and inactivity detection
0x28	40	THRESH_FF	R/W	00000000	Free-fall threshold
0x29	41	TIME_FF	R/W	00000000	Free-fall time
0x2A	42	TAP_AXES	R/W	00000000	Axis control for single tap/double tap
0x2B	43	ACT_TAP_STATUS	R	00000000	Source of single tap/double tap
0x2C	44	BW_RATE	R/W	00001010	Data rate and power mode control
0x2D	45	POWER_CTL	R/W	00000000	Power-saving features control
0x2E	46	INT_ENABLE	R/W	00000000	Interrupt enable control
0x2F	47	INT_MAP	R/W	00000000	Interrupt mapping control
0x30	48	INT_SOURCE	R	00000010	Source of interrupts
0x31	49	DATA_FORMAT	R/W	00000000	Data format control
0x32	50	DATA0	R	00000000	X-Axis Data 0
0x33	51	DATA1	R	00000000	X-Axis Data 1
0x34	52	DATA0	R	00000000	Y-Axis Data 0
0x35	53	DATA1	R	00000000	Y-Axis Data 1
0x36	54	DATA0	R	00000000	Z-Axis Data 0
0x37	55	DATA1	R	00000000	Z-Axis Data 1
0x38	56	FIFO_CTL	R/W	00000000	FIFO control
0x39	57	FIFO_STATUS	R	00000000	FIFO status

Anexo 4 – Lista das Principais Funções para o ADXL345

public:

```

ADXL345();
void powerOn();
void setRangeSetting(int val);
void setActivityXYZ(bool stateX, bool stateY, bool stateZ);
void setActivityThreshold(int activityThreshold);
void setInactivityXYZ(bool stateX, bool stateY, bool stateZ);
void setInactivityThreshold(int inactivityThreshold);
void setTimeInactivity(int timeInactivity);
void readAccel(int* x, int* y, int* z);
bool triggered(byte interrupts, int mask);
byte getInterruptSource();

```

private:

```
void writeTo(byte address, byte val);
void writeToI2C(byte address, byte val);
void readFrom(byte address, int num, byte buff[]);
void readFromI2C(byte address, int num, byte buff[]);
void setRegisterBit(byte regAdress, int bitPos, bool state);
bool getRegisterBit(byte regAdress, int bitPos);
```

Anexo 5 – Características Elétricas dos Módulos SX1276 e RFM95W (LoRa) [31]

<ul style="list-style-type: none"> ◆ Supply voltage = 3.3 V ◆ Temperature = 25° C ◆ f_{XOSC} = 32 MHz ◆ bandwidth (BW) = 125 kHz ◆ Spreading Factor (SF) = 12 ◆ Error Correction Code (EC) = 4/6 ◆ Packet Error Rate (PER)= 1% ◆ CRC on payload enabled ◆ Output power = 13 dBm in transmission ◆ Payload length = 64 bytes ◆ Preamble Length = 12 symbols (programmed register <i>PreambleLength</i>=8) ◆ With matched impedances 						
<i>LoRa Receiver Specification</i>						
Symbol	Description	Conditions	Min.	Typ	Max	Unit
IDDR_L	Supply current in receiver LoRa™ mode, <i>LnaBoost</i> off	Bands 2&3, BW=7.8 to 62.5 kHz	-	11.0	-	mA
		Bands 2&3, BW = 125 kHz	-	11.5	-	mA
		Bands 2&3, BW = 250 kHz	-	12.4	-	mA
		Bands 2&3, BW = 500 kHz	-	13.8	-	mA
		Band 1, BW=7.8 to 62.5 kHz	-	9.9	-	mA
		Band 1, BW = 125 kHz	-	10.3	-	mA
		Band 1, BW = 250 kHz	-	11.1	-	mA
		Band 1, BW = 500 kHz	-	12.8	-	mA
IDDT_L	Supply current in transmitter mode	RFOP = 13 dBm RFOP = 7 dBm	- -	28 20	- -	mA mA
IDDT_H_L	Supply current in transmitter mode with an external impedance transformation	Using PA_BOOST pin RFOP = 17 dBm	-	90	-	mA
BI_L	Blocking immunity, CW interferer	offset = +/- 1 MHz	-	89	-	dB
		offset = +/- 2 MHz	-	94	-	dB
		offset = +/- 10 MHz	-	100	-	dB
IIP2_L	2nd order Input Intercept Point Unwanted tones are 20 MHz above the LO	Highest LNA gain	-	+55	-	dBm
IIP3_L_HF	3rd order Input Intercept point Unwanted tones are 1MHz and 1.995 MHz above the LO	Band 1 Highest LNA gain G1	-	-11	-	dBm
		LNA gain G2, 5dB sensitivity hit	-	-8	-	dBm

Symbol	Description	Conditions	Min.	Typ	Max	Unit
IIP3_L_LF	3rd order Input Intercept point Unwanted tones are 1MHz and 1.995 MHz above the LO	Band 2 Highest LNA gain G1: LNA gain G2,2.5dB sensitivity hit	-	-22	-	dBm
			-	-15	-	dBm
RFS_L10_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 10.4 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 11	-	-131	-	dBm
			-	-134	-	dBm
			-	-138	-	dBm
			-	-148	-	dBm
RFS_L62_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 62.5 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	-	-121	-	dBm
			-	-126	-	dBm
			-	-129	-	dBm
			-	-132	-	dBm
			-	-135	-	dBm
			-	-137	-	dBm
			-	-139	-	dBm
RFS_L125_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 125 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	-	-118	-	dBm
			-	-123	-	dBm
			-	-126	-	dBm
			-	-129	-	dBm
			-	-132	-	dBm
			-	-133	-	dBm
			-	-136	-	dBm
RFS_L250_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 250 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	-	-115	-	dBm
			-	-120	-	dBm
			-	-123	-	dBm
			-	-125	-	dBm
			-	-128	-	dBm
			-	-130	-	dBm
			-	-133	-	dBm
RFS_L500_HF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, <i>LnaBoost</i> for Band 1, using split Rx/Tx path 500 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	-	-111	-	dBm
			-	-116	-	dBm
			-	-119	-	dBm
			-	-122	-	dBm
			-	-125	-	dBm
			-	-128	-	dBm
			-	-130	-	dBm
RFS_L7.8_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 2 or 3, using split Rx/Tx path 7.8 kHz bandwidth	SF = 12 SF = 11	-	-148	-	dBm
			-	-145	-	dBm
RFS_L10_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3, 10.4 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8	-	-132	-	dBm
			-	-136	-	dBm
			-	-138	-	dBm
RFS_L62_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3, 62.5 kHz bandwidth	SF = 6 SF = 7 SF = 8 SF = 9 SF = 10 SF = 11 SF = 12	-	-123	-	dBm
			-	-128	-	dBm
			-	-131	-	dBm
			-	-134	-	dBm
			-	-135	-	dBm
			-	-137	-	dBm
			-	-140	-	dBm

Symbol	Description	Conditions	Min.	Typ	Max	Unit
RFS_L125_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3, 125 kHz bandwidth	SF = 6	-	-121	-	dBm
		SF = 7	-	-125	-	dBm
		SF = 8	-	-128	-	dBm
		SF = 9	-	-131	-	dBm
		SF = 10	-	-134	-	dBm
		SF = 11	-	-136	-	dBm
RFS_L250_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3 250 kHz bandwidth	SF = 6	-	-118	-	dBm
		SF = 7	-	-122	-	dBm
		SF = 8	-	-125	-	dBm
		SF = 9	-	-128	-	dBm
		SF = 10	-	-131	-	dBm
		SF = 11	-	-133	-	dBm
RFS_L500_LF	RF sensitivity, Long-Range Mode, highest LNA gain, Band 3 500 kHz bandwidth	SF = 6	-	-112	-	dBm
		SF = 7	-	-118	-	dBm
		SF = 8	-	-121	-	dBm
		SF = 9	-	-124	-	dBm
		SF = 10	-	-127	-	dBm
		SF = 11	-	-129	-	dBm
CCR_LCW	Co-channel rejection Single CW tone = Sens +6 dB 1% PER	SF = 7	-	5	-	dB
		SF = 8	-	9.5	-	dB
		SF = 9	-	12	-	dB
		SF = 10	-	14.4	-	dB
		SF = 11	-	17	-	dB
		SF = 12	-	19.5	-	dB
CCR_LL	Co-channel rejection	Interferer is a LoRa™ signal using same BW and same SF. Pw = Sensitivity + 3 dB		-6		dB
ACR_LCW	Adjacent channel rejection	Interferer is 1.5*BW_L from the wanted signal center frequency 1% PER, Single CW tone = Sens + 3 dB				
		SF = 7	-	60	-	dB
		SF = 12	-	72	-	dB
IMR_LCW	Image rejection after calibration.	1% PER, Single CW tone = Sens +3 dB	-	66	-	dB
FERR_L	Maximum tolerated frequency offset between transmitter and receiver, no sensitivity degradation, SF8 thru 12	All BW, +/-25% of BW The tighter limit applies (see below)		+/-25%		BW
	Maximum tolerated frequency offset between transmitter and receiver, no sensitivity degradation, SF10 thru 12	SF = 12	-50	-	50	ppm
		SF = 11	-100	-	100	ppm
		SF = 10	-200	-	200	ppm

Symbol	Description	Min	Max	Unit
VDDop	Supply voltage	1.8	3.7	V
Top	Operational temperature range	-40	+85	°C
Clop	Load capacitance on digital ports	-	25	pF
ML	RF Input Level	-	+10	dBm

Symbol	Description	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
IDDSL	Supply current in Sleep mode		-	0.2	1	uA
IDDIDLE	Supply current in Idle mode	RC oscillator enabled	-	1.5	-	uA
IDDST	Supply current in Standby mode	Crystal oscillator enabled	-	1.6	1.8	mA
IDDFS	Supply current in Synthesizer mode	FSRx	-	5.8	-	mA
IDDR	Supply current in Receive mode	LnaBoost Off, band 1	-	10.8	-	mA
		LnaBoost On, band 1	-	11.5	-	
		Bands 2&3	-	12.0	-	
IDDT	Supply current in Transmit mode with impedance matching	RFOP = +20 dBm, on PA_BOOST	-	120	-	mA
		RFOP = +17 dBm, on PA_BOOST	-	87	-	mA
		RFOP = +13 dBm, on RFO_LF/HF pin	-	29	-	mA
		RFOP = +7 dBm, on RFO_LF/HF pin	-	20	-	mA

Anexo 6 – Mapa de Registos (LoRa) [31]

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegFifo (0x00)	7-0	Fifo	rw	0x00	LoRa™ base-band FIFO data input/output. FIFO is cleared and not accessible when device is in SLEEP mode
Common Register Settings					
RegOpMode (0x01)	7	LongRangeMode	rw	0x0	0 → FSK/OOK Mode 1 → LoRa™ Mode This bit can be modified only in Sleep mode. A write operation on other device modes is ignored.
	6	AccessSharedReg	rw	0x0	This bit operates when device is in Lora mode; if set it allows access to FSK registers page located in address space (0x00:0x3F) while in LoRa mode 0 → Access LoRa registers page 0x00: 0x3F 1 → Access FSK registers page (in mode LoRa) 0x00: 0x3F
	5-4	reserved	r	0x00	reserved
	3	LowFrequencyModeOn	rw	0x01	Access Low Frequency Mode registers 0 → High Frequency Mode (access to HF test registers) 1 → Low Frequency Mode (access to LF test registers)
	2-0	Mode	rwt	0x01	Device modes 000 → SLEEP 001 → STDBY 010 → Frequency synthesis TX (FSTX) 011 → Transmit (TX) 100 → Frequency synthesis RX (FSRX) 101 → Receive continuous (RXCONTINUOUS) 110 → receive single (RXSINGLE) 111 → Channel activity detection (CAD)
(0x02)	7-0	reserved	r	0x00	-
(0x03)	7-0	reserved	r	0x00	-
(0x04)	7-0	reserved	rw	0x00	-
(0x05)	7-0	reserved	r	0x00	-
RegFrMsb (0x06)	7-0	Fr(23:16)	rw	0x6c	MSB of RF carrier frequency

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegFrMid (0x07)	7-0	Fr(15:8)	rw	0x80	MSB of RF carrier frequency
RegFrLsb (0x08)	7-0	Fr(7:0)	rw	0x00	LSB of RF carrier frequency $f_{RF} = \frac{F(XOSC) \cdot Fr}{2^{19}}$ Resolution is 61.035 Hz if F(XOSC) = 32 MHz. Default value is 0x6c8000 = 434 MHz. Register values must be modified only when device is in SLEEP or STAND-BY mode.
Registers for RF blocks					
RegPaConfig (0x09)	7	PaSelect	rw	0x00	Selects PA output pin 0 → RFO pin. Output power is limited to +14 dBm. 1 → PA_BOOST pin. Output power is limited to +20 dBm
	6-4	MaxPower	rw	0x04	Select max output power: Pmax=10.8+0.6*MaxPower [dBm]
	3-0	OutputPower	rw	0x0f	Pout=Pmax-(15-OutputPower) if PaSelect = 0 (RFO pin) Pout=17-(15-OutputPower) if PaSelect = 1 (PA_BOOST pin)
RegPaRamp (0x0A)	7-5	unused	r	-	unused
	4	reserved	rw	0x00	reserved
	3-0	PaRamp(3:0)	rw	0x09	Rise/Fall time of ramp up/down in FSK: 0000 → 3.4 ms 0001 → 2 ms 0010 → 1 ms 0011 → 500 us 0100 → 250 us 0101 → 125 us 0110 → 100 us 0111 → 62 us 1000 → 50 us 1001 → 40 us 1010 → 31 us 1011 → 25 us 1100 → 20 us 1101 → 15 us 1110 → 12 us 1111 → 10 us
RegOcp (0x0B)	7-6	unused	r	0x00	unused
	5	OcpOn	rw	0x01	Enables overload current protection (OCP) for PA: 0 → OCP disabled 1 → OCP enabled
	4-0	OcpTrim	rw	0x0b	Trimming of OCP current: Imax = 45+5*OcpTrim [mA] if OcpTrim ≤ 15 (120 mA) / Imax = -30+10*OcpTrim [mA] if 15 < OcpTrim ≤ 27 (130 to 240 mA) Imax = 240mA for higher settings Default Imax = 100mA

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegLna (0x0C)	7-5	LnaGain	rw	0x01	LNA gain setting: 000 → not used 001 → G1 = maximum gain 010 → G2 011 → G3 100 → G4 101 → G5 110 → G6 = minimum gain 111 → not used
	4-3	LnaBoostLf	rw	0x00	Low Frequency (RFI_LF) LNA current adjustment 00 → Default LNA current Other → Reserved
	2	reserved	rw	0x00	reserved
	1-0	LnaBoostHf	rw	0x00	High Frequency (RFI_HF) LNA current adjustment 00 → Default LNA current 11 → Boost on, 150% LNA current
Lora page registers					
RegFifoAddrPtr (0x0D)	7-0	FifoAddrPtr	rw	0x00	SPI interface address pointer in FIFO data buffer.
RegFifoTxBaseAddr (0x0E)	7-0	FifoTxBaseAddr	rw	0x80	write base address in FIFO data buffer for TX modulator
RegFifoRxBaseAddr (0x0F)	7-0	FifoRxBaseAddr	rw	0x00	read base address in FIFO data buffer for RX demodulator
RegFifoRxCurrentAddr (0x10)	7-0	FifoRxCurrentAddr	r	n/a	Start address (in data buffer) of last packet received
RegIrqFlags Mask (0x11)	7	RxTimeoutMask	rw	0x00	Timeout interrupt mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	6	RxDoneMask	rw	0x00	Packet reception complete interrupt mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	5	PayloadCrcErrorMask	rw	0x00	Payload CRC error interrupt mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	4	ValidHeaderMask	rw	0x00	Valid header received in Rx mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	3	TxDoneMask	rw	0x00	FIFO Payload transmission complete interrupt mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	2	CadDoneMask	rw	0x00	CAD complete interrupt mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	1	FhssChangeChannelMask	rw	0x00	FHSS change channel interrupt mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags
	0	CadDetectedMask	rw	0x00	Cad Detected interrupt Mask: setting this bit masks the corresponding IRQ in RegIrqFlags

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegIrqFlags (0x12)	7	RxTimeout	rc	0x00	Timeout interrupt: writing a 1 clears the IRQ
	6	RxDone	rc	0x00	Packet reception complete interrupt: writing a 1 clears the IRQ
	5	PayloadCrcError	rc	0x00	Payload CRC error interrupt: writing a 1 clears the IRQ
	4	ValidHeader	rc	0x00	Valid header received in Rx: writing a 1 clears the IRQ
	3	TxDone	rc	0x00	FIFO Payload transmission complete interrupt: writing a 1 clears the IRQ
	2	CadDone	rc	0x00	CAD complete: write to clear: writing a 1 clears the IRQ
	1	FhssChangeChannel	rc	0x00	FHSS change channel interrupt: writing a 1 clears the IRQ
	0	CadDetected	rc	0x00	Valid Lora signal detected during CAD operation: writing a 1 clears the IRQ
RegRxBytes (0x13)	7-0	FifoRxBytesNb	r	n/a	Number of payload bytes of latest packet received
RegRxHeaderCntValueMsb (0x14)	7-0	ValidHeaderCntMsb(15:8)	r	n/a	Number of valid headers received since last transition into Rx mode, MSB(15:8). Header and packet counters are reseted in Sleep mode.
RegRxHeaderCntValueLsb (0x15)	7-0	ValidHeaderCntLsb(7:0)	r	n/a	Number of valid headers received since last transition into Rx mode, LSB(7:0). Header and packet counters are reseted in Sleep mode.
RegRxPacketCntValueMsb (0x16)	7-0	ValidPacketCntMsb(15:8)	rc	n/a	Number of valid packets received since last transition into Rx mode, MSB(15:8). Header and packet counters are reseted in Sleep mode.
RegRxPacketCntValueLsb (0x17)	7-0	ValidPacketCntLsb(7:0)	r	n/a	Number of valid packets received since last transition into Rx mode, LSB(7:0). Header and packet counters are reseted in Sleep mode.
RegModemStatus (0x18)	7-5	RxCodingRate	r	n/a	Coding rate of last header received
	4	ModemStatus	r	'1'	Modem clear
	3		r	'0'	Header info valid
	2		r	'0'	RX on-going
	1		r	'0'	Signal synchronized
	0		r	'0'	Signal detected

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegPktSnrValue (0x19)	7-0	PacketSnr	r	n/a	Estimation of SNR on last packet received. In two's complement format multiplied by 4. $SNR[dB] = \frac{PacketSnr[twos\ complement]}{4}$
RegPktRssiValue (0x1A)	7-0	PacketRssi	r	n/a	RSSI of the latest packet received (dBm): RSSI[dBm] = -157 + Rssi (using HF output port, SNR >= 0) or RSSI[dBm] = -164 + Rssi (using LF output port, SNR >= 0) (see section 5.5.5 for details)
RegRssiValue (0x1B)	7-0	Rssi	r	n/a	Current RSSI value (dBm) RSSI[dBm] = -157 + Rssi (using HF output port) or RSSI[dBm] = -164 + Rssi (using LF output port) (see section 5.5.5 for details)
RegHopChannel (0x1C)	7	PllTimeout	r	n/a	PLL failed to lock while attempting a TX/RX/CAD operation 1 → PLL did not lock 0 → PLL did lock
	6	CrcOnPayload	r	n/a	CRC Information extracted from the received packet header (Explicit header mode only) 0 → Header indicates CRC off 1 → Header indicates CRC on
	5-0	FhssPresentChannel	r	n/a	Current value of frequency hopping channel in use.

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegModemConfig1 (0x1D)	7-4	Bw	rw	0x07	Signal bandwidth: 0000 → 7.8 kHz 0001 → 10.4 kHz 0010 → 15.6 kHz 0011 → 20.8kHz 0100 → 31.25 kHz 0101 → 41.7 kHz 0110 → 62.5 kHz 0111 → 125 kHz 1000 → 250 kHz 1001 → 500 kHz other values → reserved In the lower band (169MHz), signal bandwidths 8&9 are not supported)
	3-1	CodingRate	rw	'001'	Error coding rate 001 → 4/5 010 → 4/8 011 → 4/7 100 → 4/8 All other values → reserved In implicit header mode should be set on receiver to determine expected coding rate. See 4.1.1.3
	0	ImplicitHeaderModeOn	rw	0x0	0 → Explicit Header mode 1 → Implicit Header mode
RegModemConfig2 (0x1E)	7-4	SpreadingFactor	rw	0x07	SF rate (expressed as a base-2 logarithm) 6 → 64 chips / symbol 7 → 128 chips / symbol 8 → 256 chips / symbol 9 → 512 chips / symbol 10 → 1024 chips / symbol 11 → 2048 chips / symbol 12 → 4096 chips / symbol other values reserved.
	3	TxContinuousMode	rw	0	0 → normal mode, a single packet is sent 1 → continuous mode, send multiple packets across the FIFO. (used for spectral analysis)
	2	RxPayloadCrcOn	rw	0x00	Enable CRC generation and check on payload: 0 → CRC disable 1 → CRC enable If CRC is needed, RxPayloadCrcOn should be set: - in Implicit header mode: on Tx and Rx side - in Explicit header mode: on the Tx side alone (recovered from the header in Rx side)
	1-0	SymbTimeout(9:8)	rw	0x00	RX Time-Out MSB
RegSymbTimeoutLsb (0x1F)	7-0	SymbTimeout(7:0)	rw	0x64	RX Time-Out LSB RX operation time-out value expressed as number of symbols: $TimeOut = SymbTimeout \cdot Ts$

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegPreambleMsb (0x20)	7-0	PreambleLength(15:8)	rw	0x0	Preamble length MSB, = PreambleLength + 4,25 Symbols. See 4.1.1 for more details.
RegPreambleLsb (0x21)	7-0	PreambleLength(7:0)	rw	0x8	Preamble Length LSB
RegPayloadLength (0x22)	7-0	PayloadLength(7:0)	rw	0x1	Payload length in bytes. The register needs to be set in implicit header mode for the expected packet length. A 0 value is not permitted
RegMaxPayloadLength (0x23)	7-0	PayloadMaxLength(7:0)	rw	0xff	Maximum payload length; if header payload length exceeds value a header CRC error is generated. Allows filtering of packet with a bad size.
RegHopPeriod (0x24)	7-0	FreqHoppingPeriod(7:0)	rw	0x0	Symbol periods between frequency hops. (0 = disabled). 1st hop always happen after the 1st header symbol
RegFifoRxByteAddr (0x25)	7-0	FifoRxByteAddrPtr	r	n/a	Current value of RX databuffer pointer (address of last byte written by Lora receiver)
RegModemConfig3 (0x26)	7-4	Unused	r	0x00	
	3	LowDataRateOptimize	rw	0x00	0 → Disabled 1 → Enabled; mandated for when the symbol length exceeds 16ms
	2	AgcAutoOn	rw	0x00	0 → LNA gain set by register LnaGain 1 → LNA gain set by the internal AGC loop
	1-0	Reserved	rw	0x00	Reserved
(0x27)	7-0	PpmCorrection	rw	0x00	Data rate offset value, used in conjunction with AFC
RegFeiMsb (0x28)	7-4	Reserved	r	n/a	Reserved
	3-0	FreqError(19:16)	r	0x0	Estimated frequency error from modem MSB of RF Frequency Error $F_{Error} = \frac{FreqError \times 2^{24}}{F_{stal}} \times \frac{BW[kHz]}{500}$
	7-0	FreqError(15:8)	r	0x0	Middle byte of RF Frequency Error
RegFeiLsb (0x2A)	7-0	FreqError(7:0)	r	0x0	LSB of RF Frequency Error
(0x2B)	-	Reserved	r	n/a	Reserved
RegRssiWideband (0x2C)	7-0	RssiWideband(7:0)	r	n/a	Wideband RSSI measurement used to locally generate a random number
(0x2D) - (0x30)	-	Reserved	r	n/a	Reserved

Name (Address)	Bits	Variable Name	Mode	Reset	LoRa™ Description
RegDetectOptimize (0x31)	7-3	Reserved	r	0xC0	Reserved
	2-0	DetectionOptimize	rw	0x03	LoRa Detection Optimize 0x03 → SF7 to SF12 0x05 → SF6
(0x32)	-	Reserved	r	n/a	Reserved
RegInvertIQ (0x33)	7	Reserved	rw	0x0	Reserved
	6	InvertIQ	rw	0x0	Invert the LoRa I and Q signals 0 → normal mode 1 → I and Q signals are inverted
	5-0	Reserved	rw	0x27	Reserved
(0x34) - (0x36)	-	Reserved	r	n/a	Reserved
RegDetectionThreshold (0x37)	7-0	DetectionThreshold	rw	0x0A	LoRa detection threshold 0x0A → SF7 to SF12 0x0C → SF6
(0x38)	-	Reserved	r	n/a	Reserved
RegSyncWord (0x39)	7-0	SyncWord	rw	0x12	LoRa Sync Word Value 0x34 is reserved for LoRaWAN networks
(0x3A) - (0x3F)	-	Reserved	r	n/a	Reserved

Anexo 7 – Lista das Principais Funções para o SX1276/RFM95W (LoRa)

public:

```

RH_RF95(uint8_t slavePin, uint8_t interruptPin, RHGenericSPI& spi);
bool init();
bool printRegisters();
void setModemRegisters(ModemConfig* config);
bool setModemConfig(ModemConfigChoice index);
bool available();
bool recv(uint8_t* buf, uint8_t* len);
bool send(uint8_t* data, uint8_t len);
void setPreambleLength(uint16_t bytes);
uint8_t maxMessageLength();
bool setFrequency(float centre);
void setModeIdle();
void setModeRx();
void setModeTx();
void setTxPower(int8_t power, bool useRFO);
bool sleep();
bool isChannelActive();

```

```
void enableTCXO();  
int frequencyError();  
int lastSNR();  
void setSpreadingFactor(uint8_t sf);  
void setSignalBandwidth(long sbw);  
void setCodingRate4(uint8_t denominator);  
void setLowDatarate();  
void setPayloadCRC(bool on);
```

protected:

```
void handleInterrupt();  
void validateRxBuf();  
void clearRxBuf();
```

private:

```
void isr0();  
void isr1();  
void isr2();
```