

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

Igor Oliveira Lara

**Aplicação de tecnologia de comunicação  
LPWAN LoRa em uma rede IoT de longa  
distância**

São João del-Rei

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

Igor Oliveira Lara

**Aplicação de tecnologia de comunicação LPWAN LoRa  
em uma rede IoT de longa distância**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de mestre em Ciências no  
Curso de Mestrado do Programa de Pós Gra-  
duação em Ciência da Computação da UFSJ.

Orientador: Daniel Ludovico Guidoni

Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ

Mestrado em Ciência da Computação

São João del-Rei

2022

Igor Oliveira Lara

## **Aplicação de tecnologia de comunicação LPWAN LoRa em uma rede IoT de longa distância**

Dissertação apresentada como requisito para  
obtenção do título de mestre em Ciências no  
Curso de Mestrado do Programa de Pós Gra-  
duação em Ciência da Computação da UFSJ.

Trabalho aprovado. São João del-Rei, 17 de dezembro de 2021:

---

**Daniel Ludovico Guidoni**  
Orientador

---

**Flávio Luiz Schiavoni**  
Membro Interno

---

**Felipe Domingos da Cunha**  
Membro Externo

São João del-Rei  
2021

# Agradecimentos

A minha querida mãe por toda dedicação, amor e apoio nos momentos mais difíceis.  
Ao meu pai por bons conselhos, ajuda e preocupação.

Agradeço por toda paciência, ajuda e carinho nesse período de dedicação ao mestrado a minha amada esposa Cinelli Tardioli.

Ao meu Orientador professor Daniel Ludovico Guidoni, por compartilhar pacientemente seu conhecimento e nos momentos mais complexos dessa jornada apresentar direcionamentos que possibilitaram terminar esse trabalho, além da dedicação durante as disciplinas. Sem toda essa dedicação do Professor Guidoni não chegaria ao final dessa jornada.

A professora Carolina Ribeiro Xavier e os professores Daniel Madeira e Leonardo Chaves Dutra da Rocha pelo conhecimento compartilhado e bons momentos durante as aulas.

Agradeço aos seguintes amigos e amigas por ajudarem com a resolução de problemas durante o curso, compartilhando tempo e conhecimento: Eduardo Nascimento, Luciano “Pit” Ribeiro, Kleber Rezende, Marcos Souza, Luiz Flávio Reis Fernandes, Lucas Ribeiro, Ana Roberta, Ronaldo Marques, Pâmela Molina e Ítalo Cordeiro.

A minha amigona de “quatro patas” Pipi, por sua companhia em noites e feriados de estudos.

Agradecimentos especiais aos amigos que contribuíram na execução do experimento que gerou este trabalho, sem a colaboração e conhecimento dos amigos Marcos Dias, Matheus Villas Boas e Silvino Santos Pimenta a execução seria muito mais demorada, complexa e talvez não tivesse sucesso.



# Resumo

Transmitir, armazenar e processar informações se tornou essencial e as redes de comunicação cada vez mais necessárias. Com esta expansão do tráfego de informação, verifica-se o aumento das redes baseadas no conceito de “Internet of Things” (IoT - Internet of Things). O uso de redes IoT pode ocorrer em diversas aplicações, onde os dispositivos que precisam se comunicar podem estar fisicamente próximos ou a distâncias de alguns quilômetros e com acesso restrito a fontes de energia elétrica. As tecnologias enquadradas como redes de longo alcance e baixo consumo de energia (LPWAN - Low Power Wide Area Network), são ideais para fornecer comunicação em longas distâncias, com baixo consumo de energia e que não necessite de grande largura de banda. A tecnologia LoRa atende a esses requisitos e está sendo amplamente estudada, aplicada e seu custo é mais acessível do que outras tecnologias LPWAN. Este trabalho visa desenvolver dois protótipos funcionais para comunicação usando a tecnologia LoRa, realizar testes Indoor e Outdoor e analisar os resultados obtidos em transmissões considerando o funcionamento da rede em um ambiente real. Nos testes foram efetuadas transmissões entre poucos metros de distância nos testes indoor e de até 4 quilômetros como distância máxima comprovando o funcionamento da tecnologia em ambiente não simulado.

**Palavras-chaves:** LoRa, LPWAN, Internet da Coisas, Redes de Computadores

# Abstract

Transmitting, storing and processing information has become essential and communication networks increasingly necessary. With this expansion of information traffic, the number of networks based on the concept of “Internet of Things” (IoT - Internet of Things) increases. The use of IoT networks can occur in several applications, where the devices that need to communicate can be physically close or at a distance of a few kilometers and with restricted access to electrical energy sources. The technologies framed as long-range networks and low energy consumption (LPWAN - Low Power Wide Area Network), are ideal for providing communication over long distances, with low energy consumption and that does not require large bandwidth. LoRa technology meets these requirements and is being widely studied, applied, and is more affordable than other LPWAN technologies. This work aims to develop two functional prototypes for communication using LoRa technology, perform Indoor and Outdoor tests and analyze the results obtained considering the functioning of the network in a real environment. In the tests, transmissions were carried out between a few meters of distance in the indoor tests and up to 4 kilometers as a maximum distance, proving the operation of the technology in a non-simulated environment.

**Key-words:** LoRa, LPWAN, Internet of Things, Computer Networks

# Lista de ilustrações

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Pilha da Tecnologia LoRaWAN . . . . .                                                                | 19 |
| Figura 2 – Exemplo de uma rede LoRaWAN . . . . .                                                                | 20 |
| Figura 3 – transmissão de beacon classe B . . . . .                                                             | 22 |
| Figura 4 – transmissão sem beacon . . . . .                                                                     | 23 |
| Figura 5 – Quadros de transmissão e recepção classe C . . . . .                                                 | 23 |
| Figura 6 – Estrutura Uplink PHY . . . . .                                                                       | 24 |
| Figura 7 – Estrutura Downlink PHY . . . . .                                                                     | 24 |
| Figura 8 – Elementos do formato de mensagens LoRa . . . . .                                                     | 24 |
| Figura 9 – Placa Arduino Uno, shield LoRa Dragino e antena omnidirecional de<br>3dBi . . . . .                  | 30 |
| Figura 10 – Prototipo do dispositivo emissor conectado ao powerbank . . . . .                                   | 31 |
| Figura 11 – Município de Inconfidentes-MG . . . . .                                                             | 32 |
| Figura 12 – Fachada do prédio principal do IFSULDEMINAS-Campus Inconfidentes                                    | 33 |
| Figura 13 – Fachadas do Prédio Principal em 1918,1978 e 2018 Cartaz 100 anos . .                                | 33 |
| Figura 14 – Parede do Prédio Principal . . . . .                                                                | 34 |
| Figura 15 – Distância entre receptor e emissor no teste entre andares . . . . .                                 | 34 |
| Figura 16 – Distância entre receptor e emissor no teste de 62 metros . . . . .                                  | 35 |
| Figura 17 – Planta do 1º andar com os protótipos . . . . .                                                      | 35 |
| Figura 18 – Distância entre receptor e emissor no teste de 36 metros . . . . .                                  | 36 |
| Figura 19 – Planta do 1º andar com os protótipos distantes 36 metros . . . . .                                  | 36 |
| Figura 20 – Dispositivo emissor dentro do carro durante primeira bateria de testes<br>Outdoor . . . . .         | 37 |
| Figura 21 – Primeira bateria de testes Outdoor – distância 598 metros . . . . .                                 | 37 |
| Figura 22 – Primeira bateria de testes Outdoor – distância 1,21 quilômetro . . . . .                            | 38 |
| Figura 23 – Terceira bateria de testes Outdoor – distância 1,58 quilômetro . . . . .                            | 39 |
| Figura 24 – Quarta bateria de testes Outdoor – 2 quilômetros . . . . .                                          | 39 |
| Figura 25 – Quinta bateria de testes Outdoor – 4 quilômetros . . . . .                                          | 40 |
| Figura 26 – Protótipo emissor na cruz de pedra . . . . .                                                        | 40 |
| Figura 27 – Valores médios do RSSI - primeira bateria de testes indoor . . . . .                                | 42 |
| Figura 28 – Valores médios do SNR - primeira bateria de testes indoor . . . . .                                 | 42 |
| Figura 29 – Número de mensagens recebidas sem erro - primeira bateria de testes<br>indoor . . . . .             | 43 |
| Figura 30 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - primeira bateria<br>de testes indoor . . . . . | 43 |
| Figura 31 – Valores médios do RSSI - segunda bateria de testes indoor . . . . .                                 | 44 |



|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 –Valores médios do SNR - segunda bateria de testes indoor . . . . .                                         | 44 |
| Figura 33 –Número de mensagens recebidas sem erro - segunda bateria de testes indoor . . . . .                        | 45 |
| Figura 34 –Figura 36: Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - segunda bateria de testes indoor . . . . . | 45 |
| Figura 35 –Valores médios do RSSI - terceira bateria de testes indoor . . . . .                                       | 46 |
| Figura 36 –Valores médios do SNR - terceira bateria de testes indoor . . . . .                                        | 47 |
| Figura 37 –Número de mensagens recebidas sem erro - terceira bateria de testes indoor . . . . .                       | 47 |
| Figura 38 –Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - terceira bateria de testes indoor . . . . .           | 48 |
| Figura 39 –Valores médios do RSSI - primeira bateria de testes outdoor . . . . .                                      | 48 |
| Figura 40 –Valores médios do SNR - primeira bateria de testes indoor . . . . .                                        | 49 |
| Figura 41 –Número de mensagens recebidas sem erro - primeira bateria de testes outdoor . . . . .                      | 50 |
| Figura 42 –Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - primeira bateria de testes outdoor . . . . .          | 50 |
| Figura 43 –Valores médios do RSSI - segunda bateria de testes outdoor . . . . .                                       | 51 |
| Figura 44 –Valores médios do SNR - segunda bateria de testes outdoor . . . . .                                        | 51 |
| Figura 45 –número de mensagens recebidas sem erro - segunda bateria de testes outdoor . . . . .                       | 52 |
| Figura 46 –Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - segunda bateria de testes outdoor . . . . .           | 53 |
| Figura 47 –Valores médios do RSSI - terceira bateria de testes outdoor . . . . .                                      | 53 |
| Figura 48 –Valores médios do SNR - terceira bateria de testes outdoor . . . . .                                       | 54 |
| Figura 49 –número de mensagens recebidas sem erro - terceira bateria de testes outdoor . . . . .                      | 54 |
| Figura 50 –Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - terceira bateria de testes outdoor . . . . .          | 55 |
| Figura 51 –Valores médios do RSSI - quarta bateria de testes outdoor . . . . .                                        | 55 |
| Figura 52 –Valores médios do SNR -quarta bateria de testes outdoor . . . . .                                          | 56 |
| Figura 53 –Número de mensagens recebidas sem erro - quarta bateria de testes outdoor . . . . .                        | 56 |
| Figura 54 –Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - quarta bateria de testes outdoor . . . . .            | 57 |
| Figura 55 –Valores médios do RSSI -quinta bateria de testes outdoor . . . . .                                         | 58 |
| Figura 56 –Valores médios do SNR - quinta bateria de testes outdoor . . . . .                                         | 58 |
| Figura 57 –Número de mensagens recebidas sem erro - quinta bateria de testes outdoor . . . . .                        | 59 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 58 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - quinta bateria<br>de testes outdoor . . . . . | 59 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

# Lista de tabelas

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Consumo de energia chip SX1276 . . . . .                  | 26 |
| Tabela 2 – Custo dos componentes para montar os protótipos . . . . . | 31 |

# Sumário

|          |                                                                                           |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                                                         | <b>13</b> |
| 1.1      | Objetivos                                                                                 | 14        |
| 1.1.1    | Objetivos Específicos                                                                     | 14        |
| 1.2      | Organização do Texto                                                                      | 15        |
| <b>2</b> | <b>Referencial Teórico</b>                                                                | <b>16</b> |
| 2.1      | Redes sem fio                                                                             | 16        |
| 2.1.1    | RSSI                                                                                      | 16        |
| 2.1.2    | SNR                                                                                       | 16        |
| 2.2      | IoT                                                                                       | 17        |
| 2.3      | LPWAN                                                                                     | 17        |
| 2.4      | SIGFOX                                                                                    | 18        |
| 2.5      | 802.11AH                                                                                  | 18        |
| 2.6      | LoRa                                                                                      | 19        |
| 2.6.1    | Arquitetura LoRaWAN                                                                       | 19        |
| 2.6.2    | Camada LoRaWAN                                                                            | 20        |
| 2.6.3    | Classes de dispositivos terminais LoRaWAN                                                 | 21        |
| 2.6.4    | Formato de Mensagens LoRa                                                                 | 24        |
| 2.6.5    | Camada física do LoRa(loRa PHY)                                                           | 25        |
| 2.6.6    | Consumo de Energia                                                                        | 26        |
| <b>3</b> | <b>Trabalhos Relacionados</b>                                                             | <b>27</b> |
| <b>4</b> | <b>Metodologia</b>                                                                        | <b>29</b> |
| 4.1      | Projeto do Protótipo Experimental                                                         | 30        |
| 4.2      | Cenários do Experimento                                                                   | 32        |
| 4.2.1    | Cenários dos testes <i>Indoor</i>                                                         | 32        |
| 4.2.1.1  | Primeira Bateria de testes <i>indoor</i> - 73 metros de distância entre térreo e 1º andar | 34        |
| 4.2.1.2  | Segunda Bateria de testes indoor - 62 metros de distância                                 | 35        |
| 4.2.1.3  | Terceira Bateria de testes indoor - 36 metros de distância                                | 35        |
| 4.2.2    | Cenários dos testes <i>Outdoor</i>                                                        | 36        |
| 4.2.2.1  | Primeira Bateria de testes Outdoor - 598 metros                                           | 37        |
| 4.2.2.2  | Segunda Bateria de testes Outdoor - 1,2 quilômetro                                        | 38        |
| 4.2.2.3  | Terceira Bateria de testes Outdoor - 1,58 quilômetro                                      | 38        |
| 4.2.2.4  | Quarta Bateria de testes Outdoor - 2 quilômetros                                          | 39        |

|          |                                                                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.2.5  | Quinta Bateria de testes Outdoor - 4 quilômetros . . . . .                                                           | 39        |
| <b>5</b> | <b>Resultados dos Experimentos e Análises dos Resultados . . . . .</b>                                               | <b>41</b> |
| 5.1      | Resultados dos testes <i>Indoor</i> . . . . .                                                                        | 41        |
| 5.1.1    | Resultados da primeira bateria de testes <i>Indoor</i> - 73 metros de<br>distância entre térreo e 1º andar . . . . . | 41        |
| 5.1.2    | Segunda bateria de testes <i>Indoor</i> - 62 metros de distância . . . . .                                           | 44        |
| 5.1.3    | Terceira bateria de testes Indoor - 36 metros de distância . . . . .                                                 | 46        |
| 5.2      | Resultados dos testes Outdoor . . . . .                                                                              | 48        |
| 5.2.1    | Primeira bateria de testes Outdoor - 598 metros . . . . .                                                            | 48        |
| 5.2.2    | Segunda bateria de testes Outdoor - 1,2 quilômetro . . . . .                                                         | 50        |
| 5.2.3    | Terceira bateria de testes Outdoor - 1,58 quilômetro . . . . .                                                       | 53        |
| 5.2.4    | Quarta bateria de testes Outdoor - 2 quilômetros . . . . .                                                           | 55        |
| 5.2.5    | Quinta bateria de testes Outdoor - 4 quilômetros . . . . .                                                           | 57        |
| 5.3      | Análise dos Resultados . . . . .                                                                                     | 59        |
| 5.3.1    | Análise dos Resultados dos testes <i>Indoor</i> . . . . .                                                            | 60        |
| 5.3.2    | Análise dos Resultados dos testes Outdoor . . . . .                                                                  | 61        |
| 5.3.3    | Consumo de Energia nos Testes . . . . .                                                                              | 63        |
| <b>6</b> | <b>Conclusão e Trabalhos Futuros . . . . .</b>                                                                       | <b>64</b> |
|          | <b>Referências . . . . .</b>                                                                                         | <b>66</b> |

# 1 Introdução

Com a necessidade de transmitir, armazenar e processar informações a cada dia se tornando mais importante, as redes de comunicação se tornaram essenciais. As Redes de Computadores são responsáveis pelo tráfego de dados entre diferentes dispositivos, usando a Internet como exemplo. A Internet é uma rede de computadores que interconecta centenas de milhões de dispositivos em todo o mundo. Não muito tempo atrás, esses dispositivos eram principalmente computadores *desktop*, estações de trabalho Linux e os chamados servidores que armazenam e transmitem informações, mas hoje em dia, cada vez mais sistemas finais de Internet modernos, como TVs, consoles de jogos, telefones celulares, *webcams*, automóveis, dispositivos de detecção ambiental, quadros e sistemas elétricos e de segurança internos fazem parte da rede; por isso o termo “redes de computadores” está começando a soar um pouco desatualizado, devido à grande quantidade de equipamentos não tradicionais conectados à Internet [1].

Seguindo essa mudança que está ocorrendo na Internet (e também nas redes privadas de computadores), o termo “Internet das Coisas” (IoT – *Internet of Things*) está se tornando cada vez mais difundido. Basicamente, entende-se que a IoT é a forma como os objetos físicos em nosso dia a dia se interconectam por meio de uma rede, muitos desses dispositivos possuem inteligência e podem ser controlados e se comunicar por meio de redes. Os avanços nas tecnologias subjacentes permitiram que “coisas” fossem remotamente identificadas, detectadas e controladas por meio de sensores e atuadores [2]. Usando o paradigma da Internet das Coisas, podemos dizer que objetos com capacidades de detecção, processamento e comunicação podem realizar tarefas e se comunicar com outros objetos ou dispositivos [3].

A IoT pode ser aplicada em diferentes tipos de ambientes para ajudar a coletar dados por meio de sensores, automatizar atividades, colaborar na tomada de decisões (por meio da análise dos dados obtidos) reduzindo custos e aumentando a eficiência geral [3]. Cidades Inteligentes (*smart cities*), indústrias, áreas hospitalares, fazendas inteligentes (*smart farms*) são alguns exemplos de ambientes que podem colher muitos benefícios com o uso da IoT.

Objetos inteligentes são o “nó” mais externo de uma rede IoT [3,4], geralmente dentro de alguns metros ou até mesmo centenas de metros de um *gateway*, mas a aplicação em ambientes com baixa infraestrutura de comunicação e que exigem maior distância entre o objeto e o *gateway* criam problemas na transmissão de dados. Além da questão da comunicação, outro problema é o consumo de energia. Nesse caso, se não houver rede elétrica próxima de onde os objetos inteligentes estão em atividade será necessária uma

bateria e a maior otimização possível em relação ao consumo de energia do objeto.

A transmissão sem fio é a mais adotada nas redes de IoT. A maioria dos objetos inteligentes não funciona com alto processamento local e o envio de informações para um servidor (local ou na Internet) geralmente não requer alta largura de banda, por serem redes de propósito específico.

Quando se trata de redes para IoT, as redes de longo alcance e baixo consumo de energia (LPWAN - *Low Power Wide Area Network*) são amplamente utilizadas [5].

Existem vários tipos de tecnologias LPWAN e algumas das mais utilizadas e estudadas atualmente são: banda estreita para Internet das Coisas (NB-IoT *Narrowband Internet of Things*), uso de redes de telefonia móvel (redes 2G), Redes SigFox, 802.11AH e LoRa [3,5]. A escolha da melhor tecnologia passa por diversos critérios como tipo de aplicação, distância a ser transmitida, largura de banda necessária e custos de implantação e manutenção.

Nesse contexto, esta dissertação busca estudar e avaliar em um cenário real as redes LPWAN utilizando a tecnologia de comunicação LoRa. LoRa foi a tecnologia escolhida para esse trabalho devido à menor dificuldade de aquisição de equipamentos e menor custo. Trabalhos que demonstram a eficiência do LoRa para comunicação em redes IoT em variáveis distâncias, versatilidade e baixo consumo de energia em vários ambientes e aplicações foram estudados para essa decisão.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho pretende realizar testes de campo sobre o funcionamento da tecnologia LPWAN LoRa considerando o funcionamento da rede em ambientes reais (não simulados), em distâncias variadas em um prédio (*indoor*) e em área aberta urbana (*outdoor*). Após os testes analisar os resultados e verificar em quais situações e configurações a tecnologia LoRa é funcional e mais eficiente, pensando na aplicação para redes IoT.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Estudar a tecnologia LoRa e trabalhos relacionados
- Montar protótipos funcionais e de baixo custo usando Arduino e *shields* LoRa para realizar testes de comunicação
- Executar testes em cenários *Indoor* e *Outdoor*
- Coletar os dados dos testes, organizá-los e analisá-los

## 1.2 Organização do Texto

Este trabalho está dividido em seis capítulos. Este primeiro capítulo fornece uma introdução geral ao tema do projeto, explica a divisão do texto e apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos para a realização deste trabalho. O referencial teórico está contido no Capítulo 2, que aborda brevemente algumas tecnologias que serão utilizadas no trabalho e outros tópicos que estão diretamente relacionados ao tema. O Capítulo 3 contém breves descrições de trabalhos importantes sobre tópicos relacionados a este projeto. No quarto capítulo estão as definições da metodologia que foi utilizada no trabalho, bem como os tipos de testes e os protótipos que foram montados para realizar esses testes. Os resultados do experimento e a análise estão no capítulo cinco. O último capítulo contém a conclusão do trabalho e possíveis trabalhos futuros.



## 2 Referencial Teórico

Este capítulo apresenta alguns conceitos importantes relacionados a este trabalho. O referencial aborda aspectos nas sub seções dos seguintes temas: Redes sem fio, LPWAN, SIGFOX, 802.11AH e LoRa.

### 2.1 Redes sem fio

Devido à necessidade de mobilidade e indisponibilidade de espaço físico para instalação de cabos, as soluções de comunicação por meio de redes sem-fio (wireless) têm se tornado muito populares. A utilização de redes sem fio está vinculada ao ambiente e aos requisitos de comunicação dos processos estabelecidos; existem várias soluções de comunicação para redes sem fio no mercado, o uso e a escolha dessas soluções de rede dependem de vários aspectos para que a integração seja efetiva [6]. Como exemplo, a escolha de soluções LPWAN para redes IoT que operam em um grande espaço geográfico, sem uma ampla cobertura da rede elétrica e com baixa largura de banda necessária. Abaixo serão apresentados alguns indicadores da qualidade de sinal em redes sem fio que serão usados na avaliação do protótipo desta dissertação.

#### 2.1.1 RSSI

O indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI - *Receive Signal Strength Indicator*) pode ser usado para obter um indicador de qualidade de transmissão em sinais de rádio [7]. RSSI é uma medida calculada em *decibel miliwatt* (dBm), para indicar a potência na qual um sinal de rádio foi enviado ou recebido [8].

A intensidade do sinal em uma transmissão de rádio pode ser afetada por barreiras no ambiente, e mesmo que o ambiente seja aberto e os dispositivos que emitem e recebam o sinal estejam em linha de visão, pode ter seu sinal atenuado pela distância, causando assim redução na potência do seu receptor [9].

O uso do RSSI como medida de força do sinal é muito popular devido à simplicidade de sua medição e não requer hardware específico para isso [10].

#### 2.1.2 SNR

O ruído é um problema gerado por interferência eletromagnética que causa distorções nos dados transmitidos, mudando seu significado [2]. Para medir o nível de ruído em uma transmissão, uma relação entre a potência do sinal e a potência do ruído é usada,

chamada relação sinal-ruído (SNR - Signal to Noise-Ratio), para medir essa relação a unidade utilizada é chamada dBm [2]. Basicamente, quanto maior o SNR, melhor o sinal e menor a possibilidade de distorções ou erros na transmissão.

## 2.2 IoT

A Internet das Coisas (IoT) é um conceito de computação ubíquo onde dispositivos físicos, como eletrodomésticos, veículos, edifícios e gadgets, incorporados com sensores, atuadores, software e a capacidade de comunicação, podem permitir que esses objetos colem e troquem dados entre si e com a Internet, com ou sem intervenção humana [11]. Os dados coletados e trocados podem ser usados para vários fins úteis para o ambiente que está sendo usado, como automatizar processos e rotinas, por exemplo. Dependendo da aplicação, a comunicação pode ser dispositivo a dispositivo (D2D - *Device to device*) ou pode tornar tais objetos acessíveis através da Internet [12]. O conceito de IoT não define um padrão específico ou tecnologia para conectar dispositivos à rede, mas existem opções bem estabelecidas para cumprir este papel [13].

## 2.3 LPWAN

LPWAN é uma categoria de tecnologias de comunicação sem fio de baixo consumo e longo alcance. As tecnologias LPWAN são empregadas em aplicações IoT que requerem comunicação de longa distância, baixo consumo de energia e baixa largura de banda de transmissão.

Uma das principais características das LPWANs hoje é a operação em faixas não licenciadas, principalmente nas faixas reservadas para desenvolvimento industrial, científico e médico (ISM - *Industrial Scientific and Medical*) em 2,4 GHz, 868/915 MHz, 433 MHz e 169 MHz; suas camadas físicas são projetadas para ter alta sensibilidade do receptor em torno de -130 dBm, quando comparada a outras tecnologias sem fio, que estão em torno de -90 dBm a -110 dBm, essa sensibilidade é alcançada usando taxas de modulação mais lentas e maior quantidade de energia por símbolo, mas baixas taxas de modulação implicam baixas taxas de transmissão, fazendo com que não excedam 100 kbps em geral [13]. Com a junção de alta sensibilidade usando frequências abaixo da casa GHz, LPWANs são capazes de alcançar distâncias de até 10 km em áreas urbanas e 30 km ou mais em áreas rurais, se houver linha de visão [14].

Atualmente, as duas tecnologias LPWAN mais proeminentes são LoRaWAN e Sigfox; 802.11AH (HALOW) é uma tecnologia com alto potencial, mas pouco aplicada devido ao baixo número de fabricantes de equipamentos e, conseqüentemente, alto custo.

## 2.4 SIGFOX

Sigfox é uma tecnologia proprietária, da camada física à rede, a cobertura da rede SIGFOX abrange quase toda a Europa e está em fase de implantação em países da América do Sul [15]. O modelo de negócio dessa tecnologia funciona como um serviço de telefonia em modo “controle”, onde o usuário compra um terminal e paga uma taxa mensal por uma quantidade de tráfego por terminal [13].

O Sigfox usa uma técnica de modulação de largura de banda ultra estreita (UNB - *Ultra Narrow Bandwidth*) chamada de diferencial de chaveamento de mudança de fase binária (DBPSK - *Differential Binary Phase Shift Keying*), vários dispositivos podem se comunicar em distâncias superiores a 10 a 50 km com baixo consumo de energia, configuração de hardware de baixo custo e fácil implementação [15].

Para obter uma distância de transmissão alta, Sigfox trabalha com uma banda muito pequena (ultraestreita), com uma taxa de transmissão máxima de apenas 100bps. Além disso, os regulamentos regionais impõem um ciclo de trabalho limitado de 1%, ou seja, 36 segundos por hora e seis segundos por mensagem [16]; definindo um limite máximo de 140 mensagens enviadas de um endpoint par a base por dia.

## 2.5 802.11AH

Devido à alta demanda por redes operando em frequências abaixo de 1 GHz, o IEEE criou um padrão desenvolvido pelo grupo 802.11, o padrão AH (HaLow). Graças às características de propagação favoráveis de um espectro de baixa frequência, o sistema 802.11ah fornece uma banda de transmissão melhor do que o 802.11 normal operando nas bandas de 2,4 GHz e 5 GHz.

As propriedades de baixo custo e cobertura de grande área tornam o sistema 802.11ah atraente para redes de sensores de grande escala, onde o número de dispositivos envolvidos em uma determinada rede pode ser muito maior do que outros sistemas 802.11a [17]. Nos padrões mais comuns de sistemas 802.11, o número máximo de estações associadas a um ponto de acesso é 2007; no padrão 802.11ah, o número de estações associadas a um ponto de acesso é de 8.191 estações. Em uma área aberta, a cobertura do ponto de acesso pode atingir pouco mais de 1 km [18], enquanto a taxa de dados deve estar em torno de pelo menos 100 kbps neste caso de uso [19].

Em uma rede de sensores, os dispositivos terminais nas redes são provavelmente dispositivos alimentados por bateria e, portanto, os recursos de economia de energia se tornam muito mais críticos para o desempenho do sistema 802.11ah; para lidar com isso, algumas melhorias foram consideradas no design da camada MAC do 802.11ah em termos de economia de energia e suporte para um grande número de estações [17].

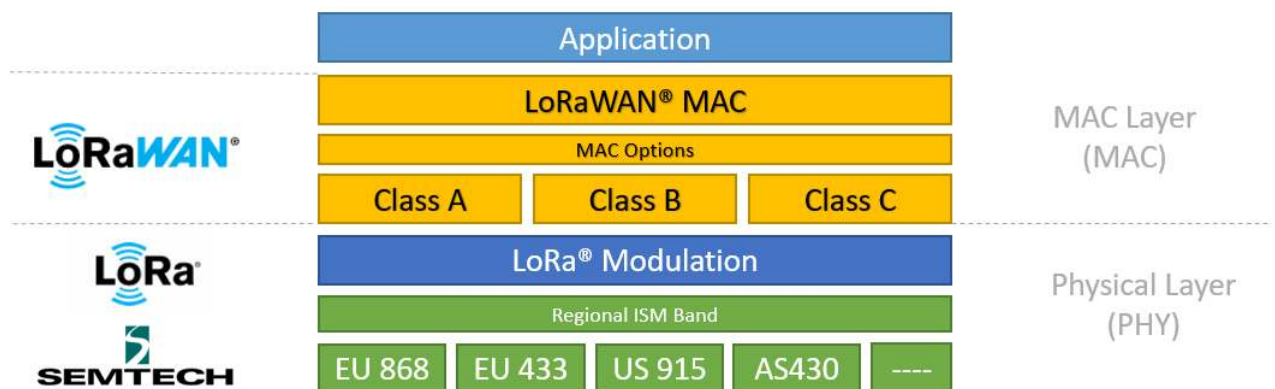
## 2.6 LoRa

LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de modulação que usa espalhamento espectral derivado da modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*), otimizada para aplicações LPWAN [17,20,21,22]. A tecnologia LoRa foi criada pela empresa francesa Cycleo e adquirida algum tempo depois pela Semtech [23].

Teoricamente, as redes LoRa podem atingir até 2 km de distância em ambientes urbanos e 15 km em área livre [20], a taxa de transmissão teórica dependendo do fator de espalhamento definido, pode variar entre 1172 a 21875 bps [3]. Devido à baixa capacidade de envio relacionada ao volume de dados, à longa distância percorrida e ao baixo consumo de energia, LoRa tornou-se uma tecnologia para comunicação em redes IoT [22] classificada como LPWAN.

### 2.6.1 Arquitetura LoRaWAN

A arquitetura LoRaWAN é baseada em um modelo de camada de função mostrado na Figura 1, onde uma pilha de protocolo é implementada para definir a comunicação entre os componentes da arquitetura de tecnologia em um único salto [3]. As duas camadas principais da arquitetura LoRaWAN são a LoRaWAN, LoRa PHY e a camada de aplicação é a terceira (relacionada aos servidores de rede e da aplicação). A especificação do LoRaWAN é mantida aberta e divulgada ao público, ao contrário das especificações do LoRa PHY [20]. Nas próximas páginas será abordado com mais detalhes as camadas LoRaWAN e LoRa PHY.



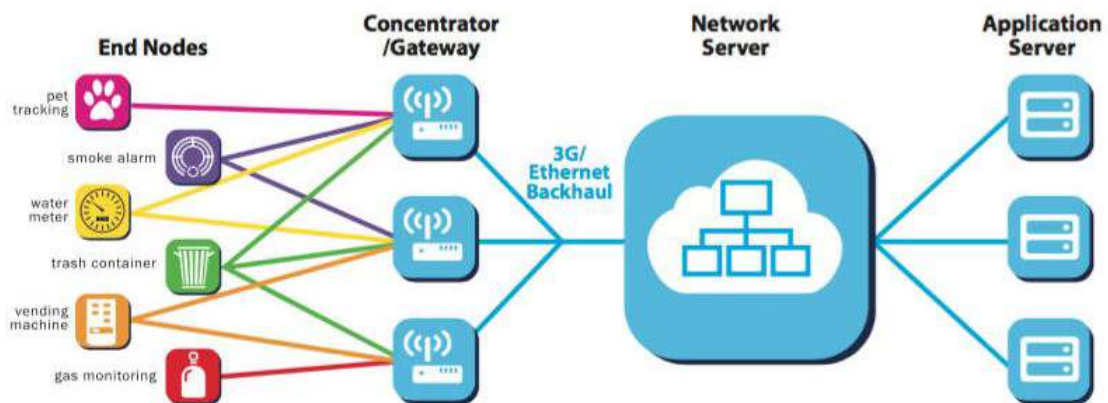
Fonte: Semtech Corporation [24]

Figura 1 – Pilha da Tecnologia LoRaWAN

### 2.6.2 Camada LoRaWAN

A camada LoRaWAN é aberta, suas regras são regidas pela LoRa Alliance, grupo formado por empresas como IBM, Actility, Semtech e Microchip; é normalmente usado em topologias em estrela [3,13].

Na camada LoRaWAN são definidos os parâmetros de comunicação e acesso ao meio (MAC-*Medium Access Control*) que utiliza a camada física LoRa; também define taxas de transmissão, suporta comunicação bidirecional e oferece serviços de mobilidade e localização de nós de rede [3].



Fonte: Ramos [21]

Figura 2 – Exemplo de uma rede LoRaWAN

Uma rede LoRaWAN é formada por terminais, *gateways* e servidores [3,15,23]. A Figura 2 contém um exemplo de uma rede LoRaWAN. Terminais são dispositivos responsáveis por obter informações ou realizar operações finais em um processo automatizado, geralmente sofrendo de restrições de energia. Os *gateways* são responsáveis pela conexão entre a rede LoRa e outras redes, esses dispositivos geralmente não sofrem grandes restrições em termos de energia. Os servidores recebem e analisam as informações enviadas pelos dispositivos terminais ou que comandam os dispositivos terminais [26].

O *gateway* LoRa gerencia a rede de dispositivos terminais, determinando sub-bandas de frequência e fatores de espalhamento (SF-*Spreading Factor*) dos terminais de rede gerenciados e enviando todos os dados recebidos dos terminais para o servidor de rede. Assim, o *gateway* atua como uma “ponte” entre os dispositivos terminais e o servidor de rede [3]. Para gerenciar isso, o *gateway* LoRa envia mensagens de configuração aos terminais para estabelecer comunicação bidirecional [3].

Em relação à segurança, as redes LoRaWAN possuem uma autenticação baseada em chaves de criptografia e uma estrutura de segurança baseada no sistema de criptografia AES-128 (*Advanced Encryption Standard*) [27]. O AES-128 criptografa o *frame* de se-

gurança e então, para garantir a integridade, é gerado um MIC (Mensagem de Integridade do Código) [22,27].

A interface de comunicação da tecnologia LoRa com os terminais e gateways é feita a partir do protocolo de interface serial (SPI - *Serial Peripheral Interface*) [3,13], possibilitando comunicação síncrona entre as camadas física e lógica e realizada pela camada de abstração de hardware (HAL- *Hardware Abstraction Layer*) que interpreta instruções de software para o hardware e o inverso [3].

### 2.6.3 Classes de dispositivos terminais LoRaWAN

Os terminais LoRaWAN podem trabalhar em três classes diferentes (“A”, “B” e “C”), dependendo do tipo de comunicação que o serviço em questão precisa realizar [20]. A classe “A” é uma classe padrão, pois as classes “B” e “C” possuem recursos opcionais, diferindo da classe padrão [18]. Todos os dispositivos LoRaWAN devem funcionar como dispositivos de classe A [3,13,20,27], aqueles que podem funcionar em mais de uma classe são chamados de “dispositivos finais de classe superior” [20].

A especificação LoRaWAN usa três quadros específicos (transmissão, recepção e *beacon*) e o tempo de atraso para exemplificar classes dos terminais [3]:

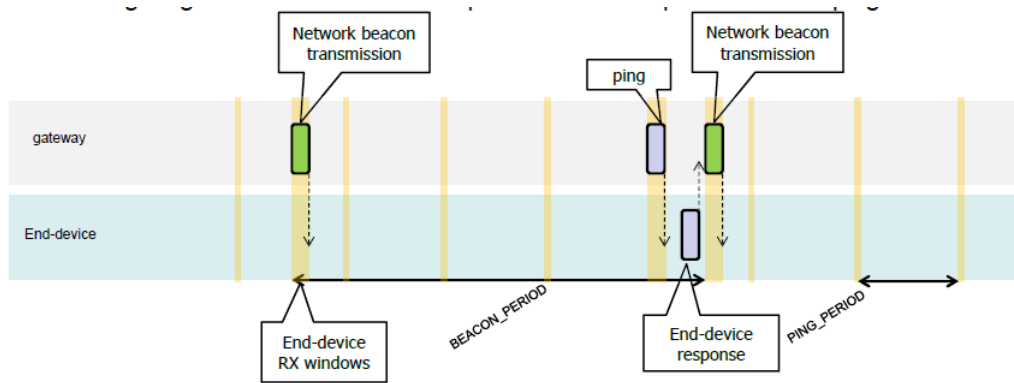
- O quadro de transmissão contém informações de *uplink* ou *downlink* trocadas entre o terminal e o servidor [3,20]; o *frame* tem seu formato diferenciado entre aqueles que enviam *uplink* ou *downlink* [20]
- O quadro de recepção contém as informações de *downlink* do servidor que devem ser enviadas ao terminal, que podem ser retransmitidas pelo *gateway* [3], em todas as classes existem dois quadros de recepção [3]. Os quadros recebidos podem conter mensagens de configuração da camada física [20]
- *Beacons* são usados por dispositivos classe B [3,13,27] visando sincronizar dispositivos da rede para comunicação [3,27].
- O tempo de atraso é estabelecido para receber ou enviar os quadros recebidos após um quadro de transmissão [3].

Terminais que trabalham na classe A podem fazer comunicação bidirecional na qual cada envio de informação (*uplink*) é seguido por duas janelas de recebimento (*downlink*) [20]. A transmissão programada pelo terminal é baseado em suas próprias necessidades de comunicação, com uma pequena variação com base no tempo aleatório (protocolo ALOHA) [20].

Um dispositivo terminal classe A pode enviar informações para o *gateway* a qualquer momento, mas para receber informações (*uplink*) o terminal fica disponível em intervalos de tempo (janelas de recebimento) após o envio de informações (*downlink*). Durante este intervalo de tempo ele pode enviar ou receber *frames* e o *gateway* pode enviar mensagens para o terminal através desses *frames* [3].

Por permitir a comunicação no *downlink* somente após o envio dos terminais, a classe A é a mais econômica em termos de energia [13,27]. O modo de operação classe A pode ser muito interessante para terminais que possuem sensores e que o tráfego de dados é enviado principalmente para o *gateway* com menor custo de energia [3].

Dispositivos da classe B funcionam de forma semelhante aos da classe A [3,20]. A principal diferença para os dispositivos classe A é que os dispositivos classe B podem abrir quadros de recepção em horários determinados, configurados através de mensagens *beacon* emitidas pelo *gateway* [3,13,20,27]. Depois de receber um *beacon*, o terminal abre uma janela extra, chamada de *ping slot* como exemplo na Figura 3.

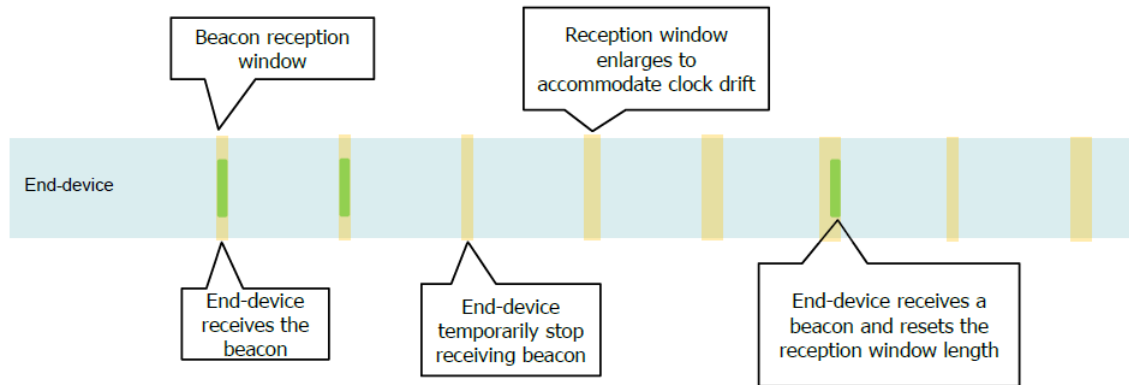


Fonte: LoRa-Aliance [20]

Figura 3 – transmissão de beacon classe B

Um terminal classe B antes de receber um *beacon* funciona de forma idêntica a classe A. Para iniciar os trabalhos em classe B o terminal deve receber um *beacon* para sincronizar seu tempo com o da rede e deve receber periodicamente outros *beacons* para corrigir qualquer desajuste e manter a sincronia [13,20]. Caso ocorra a perda de um *beacon*, o terminal pode se manter operando em classe B por até 120 minutos [13,20]. Essa operação temporária em classe B sem receber *beacon* é denominada de “*beacon-less*”. Para garantir a recepção sem sincronizar o tempo com a rede, o terminal aumenta o tempo de recepção para alargar o tamanho da janela e acomodar alguma diferença de tempo entre o terminal e a rede; essa operação é demonstrada na Figura 4.

Os dispositivos classe B têm a capacidade de fazer trocas de mensagens *Unicast* e *Multicast*. Dessa forma um terminal pode enviar uma mensagem *unicast* para um *gateway* e um *gateway* pode enviar mensagens *multicast* para múltiplos terminais [20]. Devido as janelas extras criadas pelos *beacons* o consumo de energia se torna maior que os disposi-

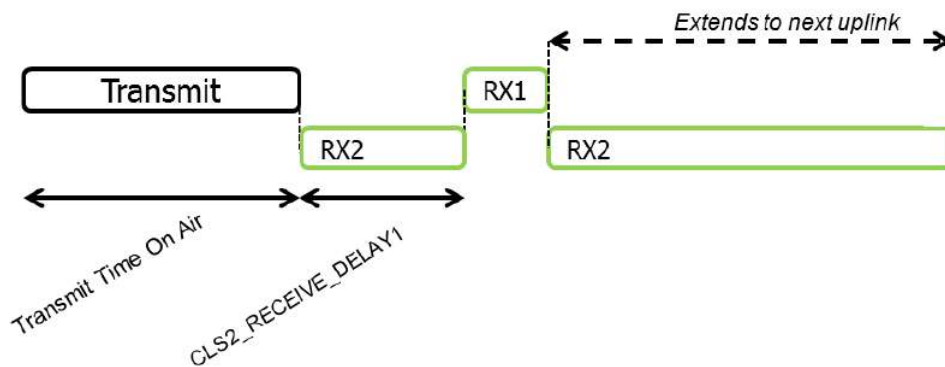


Fonte: LoRa-Aliance [20]

Figura 4 – transmissão sem beacon

tivos classe A, mas com a vantagem de receber quadros a mais em um momento previsto. O modo de operação classe B é o mais eficiente para terminais que possuem sensores e atuadores, que recebem em intervalos regulares ordens de atuação, com um consumo energético médio[3].

Terminais que funcionam na classe C têm janelas de recebimento quase o tempo todo, fecham apenas quando o dispositivo está enviando informações [3,13,20,27]. Terminais classe C devem ter fontes externas de energia (rede elétrica ou bateria de alta capacidade), pois consomem mais energia do que terminais de outras classes, pois estão disponíveis para receber dados quase continuamente, mas em compensação oferecerão menor latência na comunicação entre o servidor e o dispositivo final [13,20,27].



Fonte: LoRa-Aliance [20]

Figura 5 – Quadros de transmissão e recepção classe C

Como o exemplo da figura 5, um terminal classe C implementa duas janelas de recepção como os terminais da classe A após uma transmissão[16], a grande diferença é que após a transmissão, abertura de um quadro de recepção RX2 e seu fechamento e abertura e fechamento do quadro de recepção RX1 um quadro de recepção RX2 é novamente criado e se mantém aberto até o próximo envio do terminal[3,13,20]. O terminal pode receber um *downlink* na janela RX2 quase em qualquer momento, incluindo *downlinks* enviados para fins de comando MAC ou transmissão ACK[20]. O modo de operação classe C deve

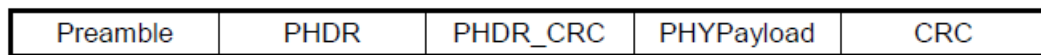


ser utilizado em terminais com sensores e atuadores que devem receber ordens de atuação a qualquer momento, exigindo maior consumo de energia [3].

## 2.6.4 Formato de Mensagens LoRa

### Formato de mensagens Físicas

O LoRa nomeia dois tipos de mensagens diferentes. *Uplink* são mensagens enviadas dos terminais para um ou mais *gateways*; mensagens *downlink* são enviadas pelo servidor com destino a um terminal específico apenas sendo transmitida com intermédio de um *gateway* apenas[13,20]. *Uplink* e *Downlink* usam um cabeçalho da camada física (PHDR-*Physical Header*) e mais um CRC desse cabeçalho (PHDR\_CRC), diferenciando as duas mensagens apenas *Uplink* possui um CRC adicional para proteger o PHYPayload[13,20].



Fonte: LoRa-Aliance [20]

Figura 6 – Estrutura Uplink PHY

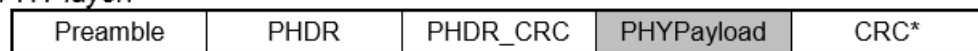


Fonte: LoRa-Aliance [20]

Figura 7 – Estrutura Downlink PHY

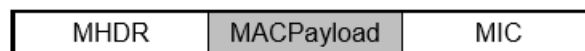
### Formato de mensagens MAC

**Radio PHY layer:**

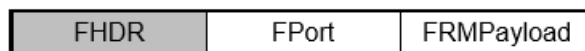


CRC\* somente em mensagens de *uplink*

**PHYPayload:**



**MACPayload:**



**FHDR:**



Fonte: LoRa-Aliance [20]

Figura 8 – Elementos do formato de mensagens LoRa

Qualquer mensagem (*uplink* ou *downlink*) LoRa carrega um *PHYPayload*, que inicia com um octeto de cabeçalho MAC (MHDR), logo após possui o *MACPayload* e finaliza com o código de integridade de mensagem que possui quatro octetos de tamanho[13,20]. A Figura 8 mostra os elementos que compõem o formato de mensagens LoRa.

### 2.6.5 Camada física do LoRa(loRa PHY)

A camada física do LoRa(*loRa PHY*) é propriedade da Semtech, baseada em uma técnica de modulação de espalhamento espectral proprietária, uma variante do espalhamento espectral por chirp (CSS - *Chirp Spread Spectrum*)[3,20,27]. O LoRa trabalha com Correção Adiantada de Erros (FEC - *Forward Error Correction*), também consegue aumentar a sensibilidade do receptor, expandir a faixa de cobertura, fornecer alta robustez, resistência ao efeito de múltiplas rotas, ao efeito *Doppler* e como toda tecnologia LPWAN permite o uso de baixa potência para a transmissão[28].

Para ocorrer a comunicação entre dois ou mais dispositivos LoRa são necessárias algumas configurações de certos parâmetros nos dispositivos. Existe a possibilidade de modificar configurações físicas em dispositivos LoRa, no a fim de conciliar o desempenho e o gasto de energia; os principais itens que podem ser modificados são a largura de banda (*bandwidth*), frequência da portadora (*carrier frequency*), taxa de codificação (*coding rate*), fator de espalhamento (*spreading factor*) e potência de transmissão.

São definidos na tecnologia LoRa três configurações para largura de banda: 125kHz, 250kHz e 500kHz[3]. As maiores larguras de banda permitem um maior fluxo de dados em detrimento de sensibilidade devido ao aumento de ruído na transmissão[24].

A frequência da portadora é a definição da frequência que os equipamentos devem funcionar; essa frequência é definida de acordo com a região de operação dos equipamentos e de forma geral não é ajustável de acordo com as aplicações [3]. O circuito integrado produzido pela Semtech é projetado para funcionar nas frequências 433 MHz e 915 MHz nos Estados Unidos e 868 MHz na Europa(bandas ISM) [28]. No Brasil o LoRa é utilizado na faixa de 915 MHz, entre 902 MHz a 907,5 Mhz e 915 Mhz a 928 Mhz [29]. A ANATEL publicou o Ato nº6506, em 2018, aprovando procedimentos para avaliação de equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita, liberando a operação de equipamentos com comunicação LoRa no Brasil [30].

A taxa de codificação está vinculada ao FEC e define a quantidade de bits utilizados para redundância de dados na mensagem a fim de realizar a recuperação do erro [3]. A taxa é a razão entre o tamanho de *payload* e a quantidade total do código (*payload* mais redundância)[3,20,27]. Existem quatro valores para definição da taxa: 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8 [3,27]. A taxa mais alta equivale a melhor proteção contra a perda de pacotes, mas causa um aumento no tempo de transmissão [3,22].

O fator de espalhamento reúne grandes sequências de bits em um único símbolo codificado para reduzir a relação sinal-ruído e interferência de outras frequências na transmissão de dados [20,29,32]. Quanto maior o SF, o SNR, alcance entre o transmissor e o receptor e o tempo de transmissão também aumentam [22,29]. Quanto menor o SF, maior a taxa de transmissão [3]. Na especificação LoRa seis valores são definidos para o fator de

espalhamento: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12 [33].

A potência de transmissão é medida em dBm, e o número da configuração de potência de transmissão é igual ao número de dBms dela. O chip SX1276 do módulo LoRa utilizado no protótipo dessa pesquisa pode trabalhar acima de 20 dBm (aproximadamente 100 miliwatts)[32]. Segundo o *datasheet* [31], o módulo pode ser configurado para uma potência de transmissão de até 21 dBm.

### 2.6.6 Consumo de Energia

O consumo de energia em uma tecnologia LPWAN é um dos itens mais relevantes, principalmente em locais de difícil acesso a um ponto de força conectado à rede elétrica.

Dependendo de diversos itens da configuração o consumo de energia pode ser mais moderado ou não, e o principal item que afeta o consumo é a potência de transmissão. Na tabela a seguir, criada com dados do *datasheet* [32] do chip SX1276 é descrito o consumo de energia por esse chip (utilizado no protótipo desse trabalho) em diferentes modos de uso, em configurações de potência de transmissão diferente.

Tabela 1 – Consumo de energia chip SX1276

| Fornecimento de energia no modo | Potência de Transmissão | Consumo padrão | Consumo Máximo | Unidade |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|---------|
| Sleep                           | Não se aplica           | 0.2            | 1              | uA      |
| Inativo                         | Não se aplica           | 1.5            |                | uA      |
| Standby                         | Não se aplica           | 1.6            | 1.8            | mA      |
| Receptor                        | Não se aplica           | 10.8           | 12.0           | mA      |
| Transmissor                     | Acima de 7 dBm          | 20             |                | mA      |
| Transmissor                     | Acima de 13 dBm         | 29             |                | mA      |
| Transmissor                     | Acima de 17 dBm         | 87             |                | mA      |
| Transmissor                     | Acima de 20 dBm         | 120            |                | mA      |

O consumo de energia do chip SX1276 segundo a tabela é muito baixo, possibilitando (na indisponibilidade de acesso a rede de energia elétrica) o uso de variadas fontes de energia.

### 3 Trabalhos Relacionados

Nessa seção serão apresentados trabalhos que influenciaram e foram referência no desenvolvimento desta dissertação. O autor Ortiz [3] apresenta em detalhes as bases teóricas da tecnologia LoRa e explica sua inclusão na categoria de redes LPWAN voltadas ao uso para IoT. O autor propõe a realização de experimentos para avaliação da tecnologia, realizando medições buscando o resultado das seguintes métricas: taxa de perdas, intensidade do sinal e relação sinal-ruído (SNR) em função de diferentes configurações de fator de espalhamentos usados na modulação. Para realizar esses testes, protótipos experimentais foram desenvolvidos usando *Arduino*. Os testes ocorreram em ambientes internos, dentro dos corredores de um prédio, e em dois ambientes externos: um ambiente florestal, em um parque nacional, e um ambiente de espaço aberto, no campus da UFRJ na Ilha do Fundão.

3m [32], os autores investigam a equivalência entre resultados de simulação e experimentos práticos que envolvem comunicação entre dispositivos reais compatíveis com a tecnologia LoRa. Para realizar esta investigação, foi realizada uma avaliação de desempenho utilizando uma unidade receptora e uma unidade transmissora, variando a distância e o fator de espalhamento e avaliando as seguintes métricas: capacidade da rede em termos de vazão, taxa de perda de mensagem, intensidade do sinal recebido e relação entre vazão teórica e vazão obtido nos experimentos.

O autor Silva [22] usou dispositivos *Lilygo TTGO LoRa®32 V2.0* para realizar testes dentro dos prédios da UFFS e avaliar o desempenho da tecnologia LoRa em uma área interna. A justificativa para os testes ocorrerem em área interna é a falta de trabalhos abordando isso. Os testes foram realizados em distâncias entre 70 centímetros e 80,65 metros. O trabalho utilizou as principais métricas encontradas nos artigos pesquisados, o RSSI, taxa de entrega de pacotes (PDR - *Packet Delivery Ratio*) e o SNR. Os testes ocorreram em seis coeficientes de espalhamento, quinze de potência e com três diferentes valores de carga útil (5,25 e 76 bytes).

Os autores em [35] explicam sobre experimentos e conceitos iniciais relacionados à construção de um repetidor LoRaWAN de baixo custo. Neste trabalho, a proposta de um repetidor LoRaWAN que é inserido entre o dispositivo final e o *gateway* (hub) foi analisada a fim de melhorar o alcance e a qualidade da comunicação LoRa, proporcionando assim cobertura de áreas onde o sinal chega com baixa potência e também sendo possível estender a rede LoRaWAN sem a necessidade de inserir um novo gateway na rede, sendo o dispositivo mais caro da infraestrutura de comunicação. O projeto do repetidor levou em consideração dois parâmetros: que o repetidor é de baixo custo e não precise estar

conectado diretamente à rede elétrica, permite sua utilização em locais remotos onde a cobertura do sinal é muito baixa.

O objetivo de Ramos em [21] era desenvolver um sistema de monitoramento de volume para uma lixeira subterrânea. O sistema deve ler o volume de resíduos através de sensores presentes em sua tampa e enviar suas informações para um servidor de dados através do protocolo LoRaWAN, onde o sistema deve ter um baixo custo de produção e baixo consumo de energia.

O objetivo geral de Sant’Ana em [13] é implementar uma rede LoRaWAN e desenvolver aplicações para ela, permitindo a verificação de seu funcionamento. Na implementação da rede LoRa neste trabalho foram utilizados *endpoints* desenvolvidos em módulos *Arduino* do tipo “mega” (devido à maior capacidade de memória RAM), um *gateway* monocanal usando *raspberry* e posteriormente um *gateway* multicanal (8 canais de comunicação). Após a implementação da rede, foi desenvolvido um sistema de gerenciamento de aplicativos LoRaWAN configurável com a finalidade de utilizar todos os recursos da plataforma utilizada para o *endpoint* personalizado, que pode ser configurado e atualizado por mensagens de controle enviadas por um servidor de rede.

Os trabalhos relacionados envolvem testes com tecnologia LoRa e implementação da tecnologia em redes LoRaWAN. Este trabalho visa realizar testes com configurações como as usadas em alguns trabalhos, mas usando protótipos de baixo custo, analisar os resultados com a perspectiva do menor consumo de energia possível e efetuar teste *outdoor* em distância superior a 2 quilômetros (4 quilômetros).

## 4 Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia aplicada no trabalho, explicando o que foi desenvolvido, os cenários, métricas e alguns subtópicos fazendo um detalhamento mais profundo sobre pontos mais importantes do trabalho. Para avaliar o funcionamento da tecnologia LoRa, mensagens predefinidas foram enviadas, em distâncias e locais específicos, para uma comparação de eficiência em diferentes configurações de fator de espalhamento e potência de transmissão.

Dois protótipos foram desenvolvidos utilizando a tecnologia LoRa para transmissão de dados na frequência de 915 Mhz (frequência definida para a América Latina e dentro das frequências não licenciadas definidas no Brasil pela ANATEL), um dos protótipos funciona como remetente e o outro como receptor de mensagens, usando a biblioteca disponibilizada no GITHUB por Sandeep Mistry [36] com algumas modificações; neste capítulo, haverá mais detalhes sobre os protótipos no tópico 4.1 “Protótipos do experimento”.

As configurações de largura de banda de 125Khz e o Code/Rate 4/5 foram mantidos seguindo o padrão.

Para cada distância, a bateria de teste consistia no envio de 100 mensagens de 11 bytes, com potências de transmissão entre 2 e 17 Dbm em cada SF entre 7 e 12; enviando 1600 mensagens por SF e totalizando 9600 mensagens enviadas em cada bateria de teste. Os testes foram realizados em ambiente fechado (*indoor*), nas distâncias aproximadas de 30 e 70 metros no mesmo andar e de 70 metros entre andares diferentes; em ambiente aberto os testes ocorreram nas distâncias aproximadas de 600, 1200, 1600, 2000 e 4000 metros. Na seção 4.2 é feita uma descrição detalhada sobre os cenários.

As métricas usadas nesse experimento foram a potência do sinal (RSSI), relação sinal ruído e porcentagem de mensagens recebidas sem erros, essas métricas foram escolhidas por serem usadas em diversos trabalhos sobre esta tecnologia como os trabalhos de Silva[22] e Ortiz[3].

Os resultados obtidos com a coleta desses dados nas transmissões de mensagens podem ser utilizados como possíveis norteadores iniciais para configurações mais eficientes na escolha e uso da tecnologia LoRa em nós de dispositivos IoT, em diferentes distâncias, aplicações e buscando melhor eficiência em relação ao consumo de energia quando necessário.

## 4.1 Projeto do Protótipo Experimental

Para a execução dos testes visando obter os dados das métricas definidas foram montados dois dispositivos idênticos, um funcionando como emissor das mensagens e outro como receptor. Nesse cenário os protótipos criam uma rede ponto-a-ponto sem a necessidade de um *gateway*.

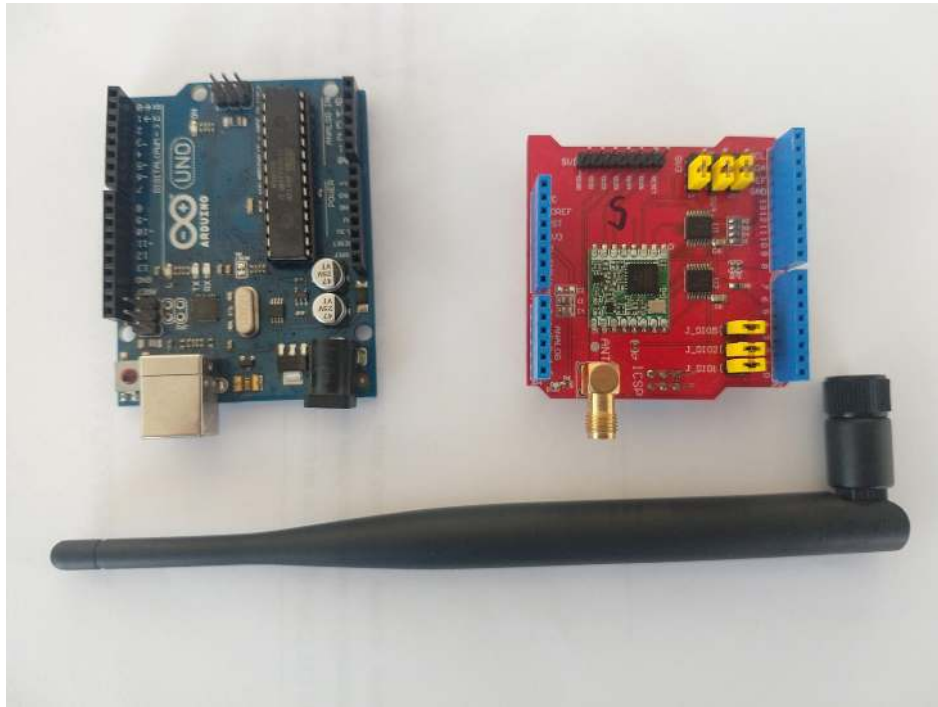


Figura 9 – Placa Arduino Uno, shield LoRa Dragino e antena omnidirecional de 3dBi

Cada dispositivo é composto por uma placa *Arduino Uno*, um *shield* LoRa Dragino de 915MHz (baseado no chip semtech sx1276/sx1278) compatível com *Arduino Uno* (e outros *Arduinos*) e uma antena omnidirecional de 915MHz com 3dBi de potência e com conector no padrão SMA (compatível com o *shield* Dragino), a Figura 9 contém esses itens separados. Para o dispositivo emissor, foi usado como fonte de energia um *powerbank* ASUS ZenPower com capacidade de 10050mAh mostrado na Figura 10.

A utilização do *powerbank* foi necessária para o melhor posicionamento do protótipo emissor sem a necessidade de um ponto de energia conectado à rede elétrica próximo nos testes internos e devido à dificuldade de obtenção de acesso à rede elétrica nos testes externos. O dispositivo receptor durante os testes foi conectado a uma porta USB de um notebook conectado diretamente à rede elétrica (em todos os testes externos o dispositivo receptor estava no mesmo local com fácil acesso à rede elétrica). O custo desses componentes está descrito na tabela 2, sendo um diferencial desse trabalho o baixo custo para montagem dos protótipos.



Figura 10 – Protótipo do dispositivo emissor conectado ao powerbank

Tabela 2 – Custo dos componentes para montar os protótipos

| Componentes                                      | Quantidade | Valor (unidade) |
|--------------------------------------------------|------------|-----------------|
| Arduíno Uno                                      | 2          | 70,00 reais     |
| Shield LoRa Dragino 915 MHz                      | 2          | 130,00 reais    |
| Antena omnidirecional de 915MHz/3dBi de potência | 2          | 20,00 reais     |
| Powerbank ASUS ZenPower 10050mAh                 | 1          | 100,00 reais    |
| Custo total de material                          |            | 540,00 reais    |

Para configuração e controle dos protótipos foram escolhidas as bibliotecas LoRa disponibilizadas no GitHub por Sandeep Mistry[36], devido alta compatibilidade com vários dispositivos LoRa (como o Shield Dragino), por vários projetos e principalmente o trabalho de Silva[22] voltados ao LoRa usar essa biblioteca. Essa biblioteca foi baixada pelo gerenciador de bibliotecas do Arduíno IDE.

Pequenas modificações foram necessárias nos códigos para os protótipos neste trabalho; as principais foram a mudança de frequência para o padrão 915Mhz e a inserção de um contador de mensagens enviadas no dispositivo emissor de forma que para cada 100 mensagens enviadas em uma determinada potência houvesse uma mudança automática para a próxima potência de transmissão até a última definida.







Fonte: Site do Campus Inconfidentes - IFSULDEMINAS [37]

Figura 12 – Fachada do prédio principal do IFSULDEMINAS-Campus Inconfidentes



Fonte: Site do Campus Inconfidentes - IFSULDEMINAS [37]

Figura 13 – Fachadas do Prédio Principal em 1918,1978 e 2018 Cartaz 100 anos

Além dos fatores específicos que facilitaram a execução do teste com menos riscos relacionados a pandemia, outro diferencial deste local é relacionado a sua estrutura; por ser um prédio com uma estrutura básica construída no início do século XX, possui algumas diferenças em relação a construções mais recentes, como paredes com 34 centímetros de espessura mostrada na Figura 14.

O protótipo receptor foi alocado na sala de aula 8, na parte oeste do 1º andar do prédio para realização das três baterias de testes. Os três testes foram realizados de forma que não ocorresse uma linha de visão, criando a necessidade que o sinal de transmissão passe por obstáculos (paredes) durante os testes; no segundo e terceiro o número de paredes foi contado e mostrado nas figuras 18 e 20, no primeiro teste não foi possível obter essa contagem devido à indisponibilidade da planta do térreo e de acesso as salas (detalhado na parte sobre a primeira bateria de testes).





Figura 14 – Parede do Prédio Principal

#### 4.2.1.1 Primeira Bateria de testes *indoor* - 73 metros de distância entre térreo e 1º andar

Na primeira bateria de testes o dispositivo emissor foi posicionado na garagem do prédio localizada no térreo (piso abaixo do primeiro andar) no lado oeste, mais longe possível do emissor (dentro do prédio) em uma distância aproximada de 73 metros. Como este teste foi feito entre dois andares não existe uma linha de visão para comunicação, mas devido indisponibilidade de planta do térreo e a falta de permissão para entrada nas salas (o térreo é ocupado por setores administrativos o que impossibilita a entrada nestas salas sem um servidor autorizado do setor acompanhando) impedindo a contagem do número de barreiras como paredes no caminho do sinal. Na figura 15 é mostrada a distância dos locais onde estão o receptor (a esquerda) e o emissor no teste entre andares.



Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 15 – Distância entre receptor e emissor no teste entre andares

#### 4.2.1.2 Segunda Bateria de testes indoor - 62 metros de distância

Para a segunda etapa dos testes *indoor* o protótipo emissor foi mantido no mesmo local da primeira bateria (no fundo da sala 8 na parte mais a oeste do primeiro andar do prédio principal), o emissor foi posicionado no fundo da sala dos professores distante 62,13 metros do emissor, a figura 16 mostra a distância entre os pontos.



Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 16 – Distância entre receptor e emissor no teste de 62 metros

A figura 17 contém a planta do primeiro andar do prédio com dois símbolos de sinal de transmissão sem fio (representando os protótipos), mostrando que para que a transmissão ocorra é necessário passar por sete paredes de 34 centímetros idênticas as da figura 16.

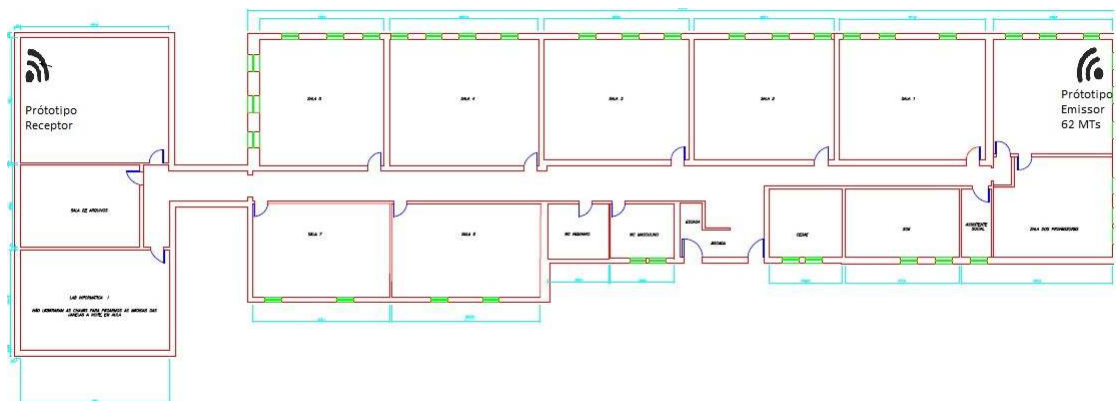


Figura 17 – Planta do 1º andar com os protótipos

#### 4.2.1.3 Terceira Bateria de testes indoor - 36 metros de distância

Na última bateria dos testes *indoor* o local padrão do protótipo receptor foi mantido e o emissor foi alocado a uma distância de 36,35 metros, mostrado na figura 18.

O dispositivo emissor foi colocado na sala 3 como mostrado na planta da figura 19.

Desta forma quando a transmissão é recebida sem erros no receptor o sinal passou quatro paredes como a demonstrada na Figura 14.





Figura 20 – Dispositivo emissor dentro do carro durante primeira bateria de testes Outdoor

A última bateria ocorreu com monitoramento local em todo o tempo e o dispositivo emissor foi colocado em local aberto.

#### 4.2.2.1 Primeira Bateria de testes Outdoor - 598 metros

A primeira bateria de testes consistiu em uma transmissão onde o dispositivo emissor estava localizado na beira da rodovia MG-295, próximo a entrada do município de Inconfidentes em um cruzamento ligando a rodovia e o bairro Santa Isabel, distante 598 metros do dispositivo do ponto base onde está o receptor, demonstrado na Figura 21 (receptor está na marcação “0”).



Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 21 – Primeira bateria de testes Outdoor – distância 598 metros

#### 4.2.2.2 Segunda Bateria de testes Outdoor - 1,2 quilômetro

Na segunda bateria dos testes Outdoor o dispositivo emissor estava próximo ao prédio onde ocorreram os testes *indoor*, na rua Tomás Antônio Gonzaga no bairro centro de Inconfidentes, distante 1,21 quilômetro do dispositivo emissor como mostrado na Figura 22.



Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 22 – Primeira bateria de testes Outdoor – distância 1,21 quilômetro

#### 4.2.2.3 Terceira Bateria de testes Outdoor - 1,58 quilômetro

O local onde dispositivo emissor realizou as transmissões na terceira bateria de testes Outdoor fica também na rua Tomás Antônio Gonzaga no bairro centro, aproximadamente a 370 metros de distância do local onde ocorreu a transmissão da segunda bateria, totalizando a distância para o dispositivo receptor no ponto base de 1,58 quilômetro, demonstrado na Figura 23.





Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 23 – Terceira bateria de testes Outdoor – distância 1,58 quilômetro

#### 4.2.2.4 Quarta Bateria de testes Outdoor - 2 quilômetros

Para a quarta bateria de testes Outdoor foi definido que a transmissão deveria ocorrer em uma distância mínima entre emissor e receptor de 2 quilômetros, distância essa obtida da varanda de uma casa localizada na rua Catarina Garcia Blessa no bairro Santa Clara. A figura 24 mostra a distância entre emissor e receptor.



Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 24 – Quarta bateria de testes Outdoor – 2 quilômetros

#### 4.2.2.5 Quinta Bateria de testes Outdoor - 4 quilômetros

A última bateria dos testes Outdoor consistiu na realização de testes de transmissão em uma distância de pouco mais de 4 quilômetros, com o dispositivo emissor na rua Pedro Bueno Gonçalves na zona rural do município de Inconfidentes no local conhecido



popularmente como “Cruz de Pedra”; a Figura 25 mostra a distância entre os locais do emissor e receptor.



Fonte: Reproduzido do Google Maps

Figura 25 – Quinta bateria de testes Outdoor – 4 quilômetros

Diferentemente das demais baterias dos testes Outdoor, na quinta e última bateria o dispositivo emissor ficou exposto ao ar livre como mostrado na Figura 26.



Figura 26 – Protótipo emissor na cruz de pedra

## 5 Resultados dos Experimentos e Análises dos Resultados

Esta seção contém os resultados dos experimentos separados entre *Indoor*, *Outdoor* e por distâncias, como no capítulo anterior. Em cada cenário, os resultados obtidos são apresentados por meio de quatro gráficos. O primeiro gráfico estilo linha contém os resultados obtidos nas transmissões em relação a média de potência RSSI (eixo Y) por SF (linha) nas potências de transmissão (nos gráficos como “TXPOWER”) 2,6,10,14 e 17(eixo X). O segundo gráfico segue mesma configuração do primeiro com a diferença que no eixo Y estão os dados médios da relação sinal ruído (SNR) das transmissões. O terceiro gráfico segue o mesmo padrão dos anteriores com a mudança dos valores do eixo Y são o número de mensagens recebidas sem erros. O quarto gráfico usa estilo barra para mostrar em porcentagem as mensagens recebidas sem erros em cada SF que foram transmitidas nas potências de transmissão (TXPOWER) entre 2 e 17dBm, totalizando 1600 mensagens por SF como detalhado anteriormente. Todos os resultados correspondem a media das 100 mensagens enviadas/recebidas para cada configuração avaliada.

### 5.1 Resultados dos testes *Indoor*

#### 5.1.1 Resultados da primeira bateria de testes *Indoor* - 73 metros de distância entre térreo e 1º andar

No primeiro teste *indoor* os valores médios de RSSI ficaram entre -120(SF11,txp2) e -98 (SF07,txpwr14 e 17). Seguindo os valores demonstrados no gráfico da Figura 27 o SF7 de modo geral obteve os melhores valores com exceção em TXPOWER02 e com os SF08 e 09 obtendo valores muito próximos e os demais SF com valores um pouco mais baixos.

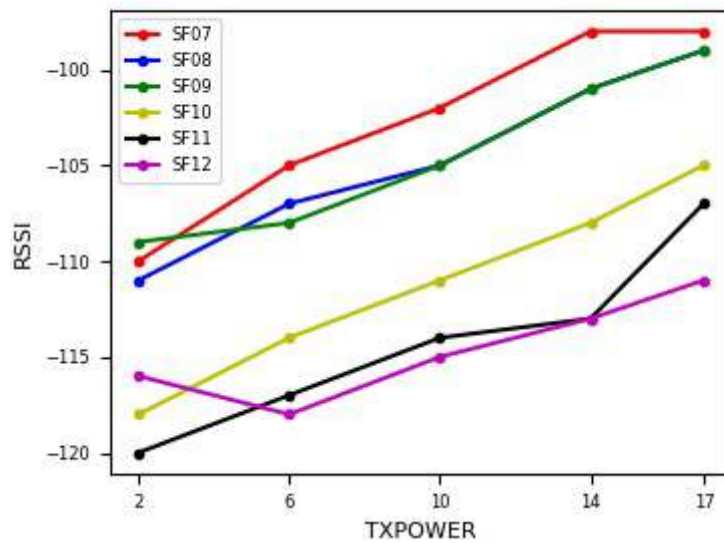


Figura 27 – Valores médios do RSSI - primeira bateria de testes indoor

Na relação sinal ruído a média dos resultados ficaram entre a mais baixa de 1,89 dBm (SF11,txp02) até a mais alta em 11,74 (SF09,txp17), nas taxas de energia ocorreu uma certa diferença entre os SF porém nas taxas mais altas ocorre uma aproximação maior conforme mostrado na Figura 28.

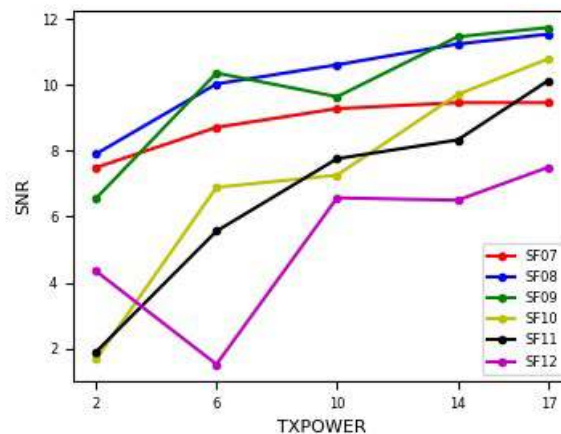


Figura 28 – Valores médios do SNR - primeira bateria de testes indoor

O número de mensagens recebidas sem erro teve pouco variação nas configurações definidas, o pior resultado foi receber 95 mensagens sem erros (SF09,txpwr 02 e 10) e várias configurações obtiveram o resultado máximo de 100 mensagens recebidas sem erros nesse teste, conforme pode ser visualizado na Figura 29.

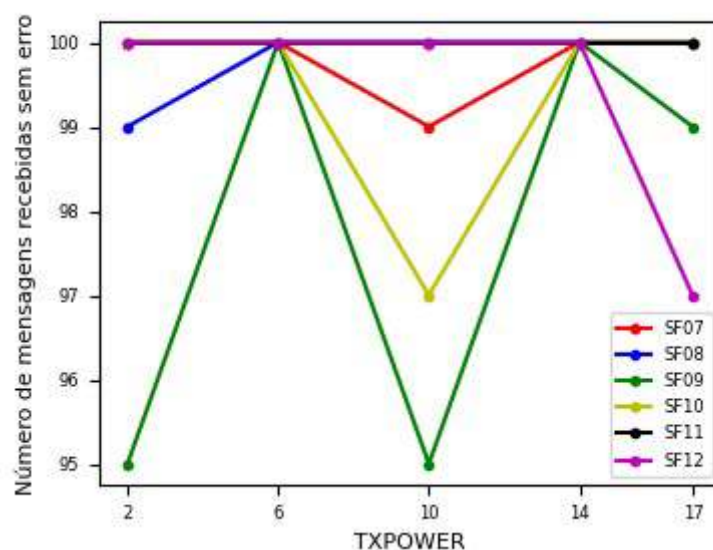


Figura 29 – Número de mensagens recebidas sem erro - primeira bateria de testes indoor

Em geral a primeira bateria de testes *indoor* teve uma baixa perda de pacotes, no SF09 ocorreu a maior perda de pacotes (perdas inferiores a 1,5%) e no SF07 atingiu uma taxa de 100% (por arredondamento, de 1600 pacotes enviados entre as taxas de energia de 2 dBm até 17 dBm apenas um pacote na taxa de 10 dBm foi perdido). A figura 32 mostra a porcentagem de mensagens recebidas sem erros.

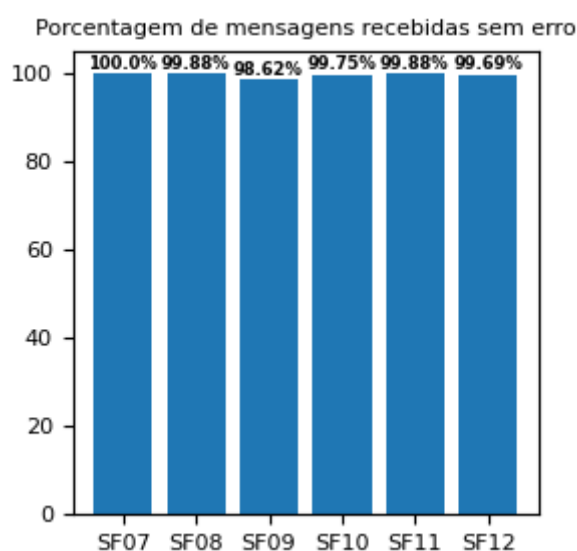


Figura 30 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - primeira bateria de testes indoor

### 5.1.2 Segunda bateria de testes *Indoor* - 62 metros de distância

Na segunda bateria de testes *Indoor* a média dos valores de RSSI obtidas está entre -97 (SF12,txp02) e -77(SF07,txp17). Em todas as configurações de potência de transmissão o SF07 obteve os melhores valores, demonstrado na Figura 31.

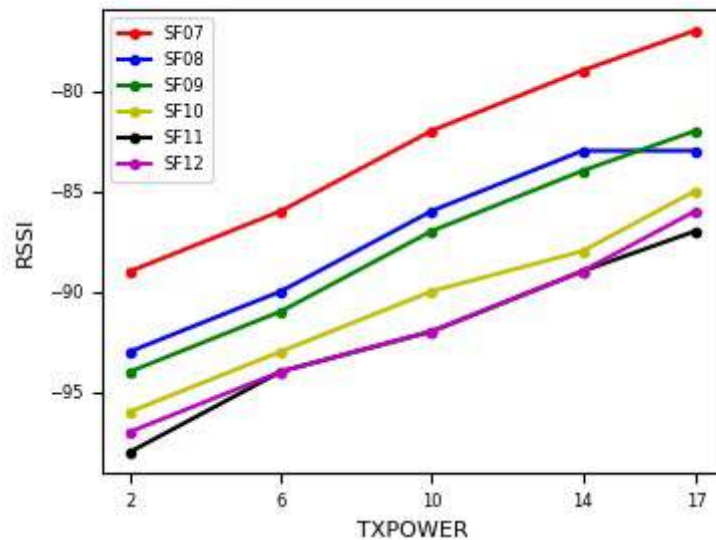


Figura 31 – Valores médios do RSSI - segunda bateria de testes indoor

Nesta bateria a média da SNR teve uma variação entre 9,40(SF07,txp17) e 13,25(SF09,txp10). Como na bateria de testes anterior ocorreu uma oscilação não padronizada entre os SF e TXP nos valores do SNR mostrada na Figura 32.

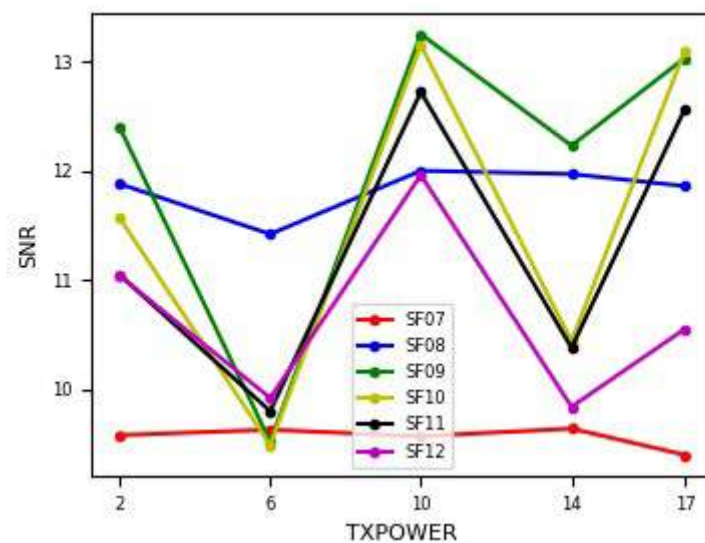


Figura 32 – Valores médios do SNR - segunda bateria de testes indoor

Apenas um pacote foi perdido no SF 11 na taxa de energia 02, nas outras taxas e SF definidos não houve perdas.

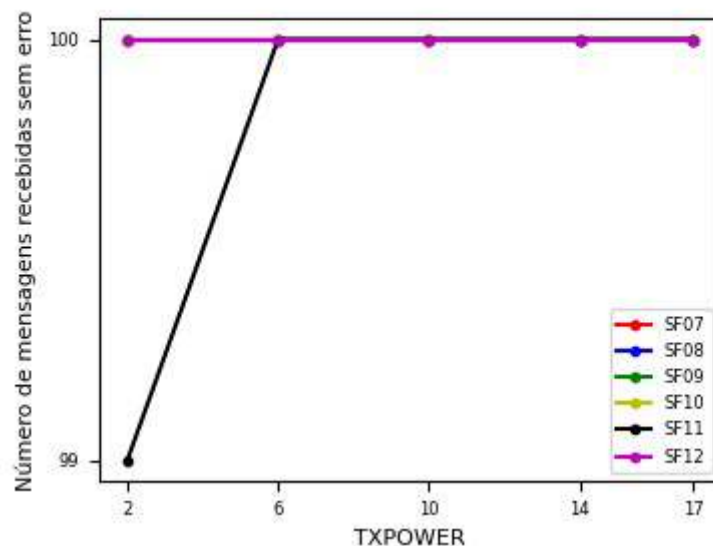


Figura 33 – Número de mensagens recebidas sem erro - segunda bateria de testes indoor

Os testes em cada SF usando as taxas de energia entre 02 e 17 sofreram poucas perdas ou erros de mensagens. No SF 09 ocorreu a menor porcentagem de mensagens sem problemas, ficando próximo de 99% e os demais obtendo resultados próximos de 100% ou 100% de mensagens recebidas sem erros como mostrado na Figura 34.

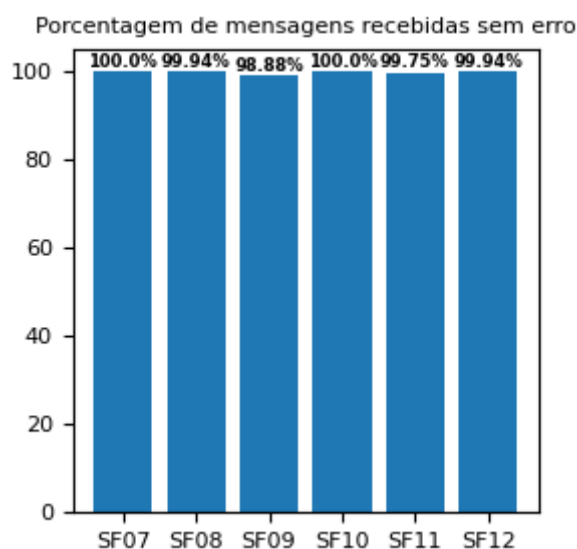


Figura 34 – Figura 36: Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - segunda bateria de testes indoor

### 5.1.3 Terceira bateria de testes Indoor - 36 metros de distância

A média dos valores de RSSI no terceiro teste Indoor ficou entre -86(SF11,txp02) e -69(SF07, txp 14 e 17). A mudança dos valores entre os SF testados não é muita alta, mas observando o gráfico da Figura 35, o SF07 obtém melhor resultado nas taxas de energias comparadas.

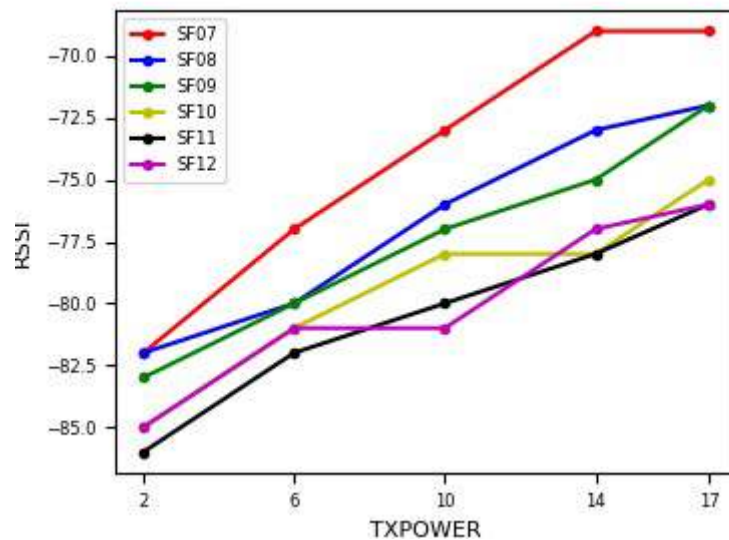


Figura 35 – Valores médios do RSSI - terceira bateria de testes indoor

A média da relação sinal ruído nessa bateria de testes teve uma oscilação entre 8,78(SF12,Txp17) e 13,17(SF09,Txp10). Com exceção do SF07 que obteve valores crescentes de forma linear no aumento das potências, nos demais SF ocorreu uma variação entre os valores sem ocorrer o padrão de “valor mais alto=taxa de energia mais alta” como é possível observar na Figura 36.



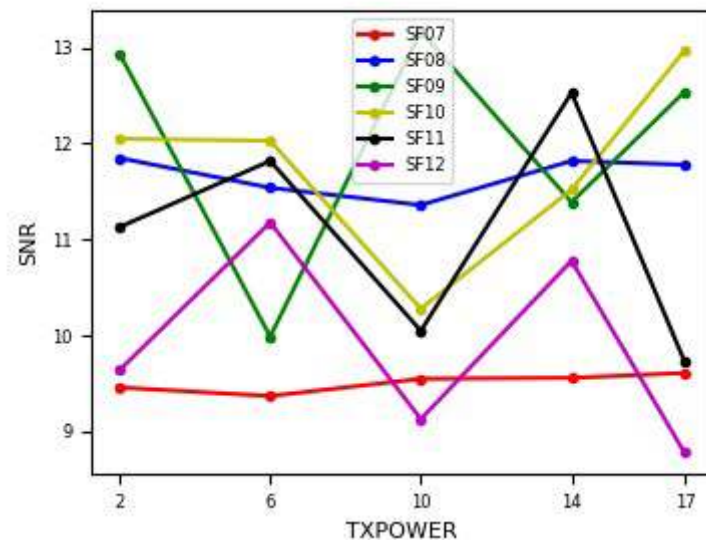


Figura 36 – Valores médios do SNR - terceira bateria de testes indoor

O número de mensagens recebidas sem erros teve uma variação quase nula ficando entre 99 e 100 mostrado no gráfico da Figura 37.

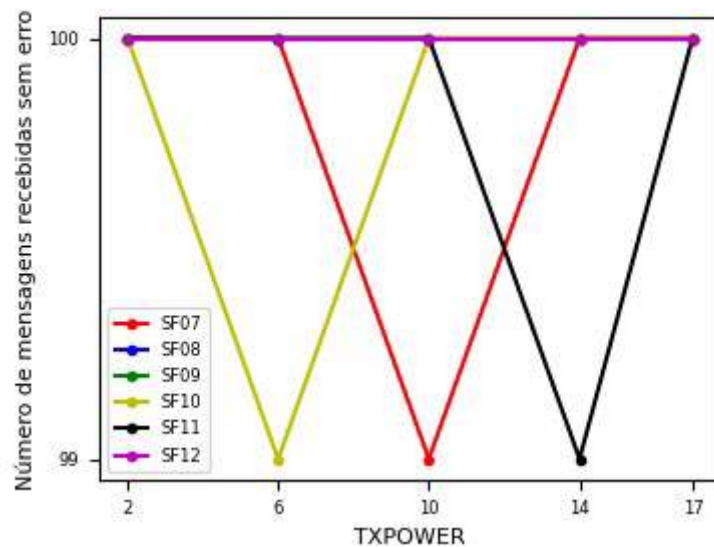


Figura 37 – Número de mensagens recebidas sem erro - terceira bateria de testes indoor

Devido a perda muito baixa em todas as configurações testadas (SF de 7 a 12 e txpower de 2 a 17), a Figura 38 mostra que a porcentagem de mensagens recebidas sem erro ficou entre 99% e 100%.



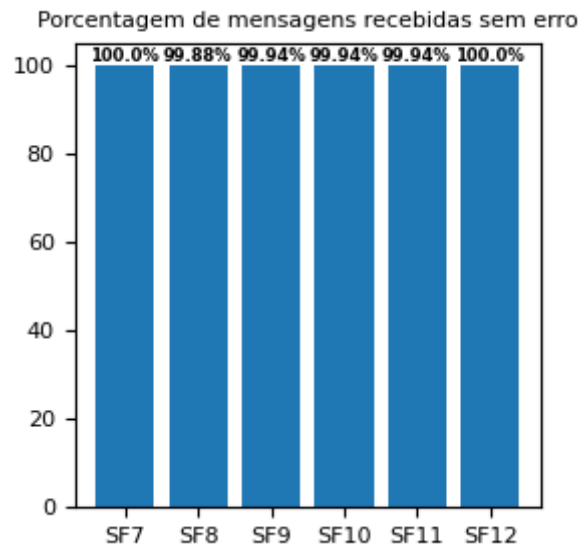


Figura 38 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - terceira bateria de testes indoor

## 5.2 Resultados dos testes Outdoor

### 5.2.1 Primeira bateria de testes Outdoor - 598 metros

A média dos valores de RSSI das transmissões na primeira bateria de testes outdoor, foi de -102 (SF07,txp17) como a melhor média e a pior foi de -118(SF11,TxP02). Em todas as taxas de energia definidas para comparação de resultados, nessa bateria de testes o SF07 obteve o melhor resultado médio e crescente com o aumento da configuração de dbm na taxa de energia como mostrado no gráfico da Figura 39.

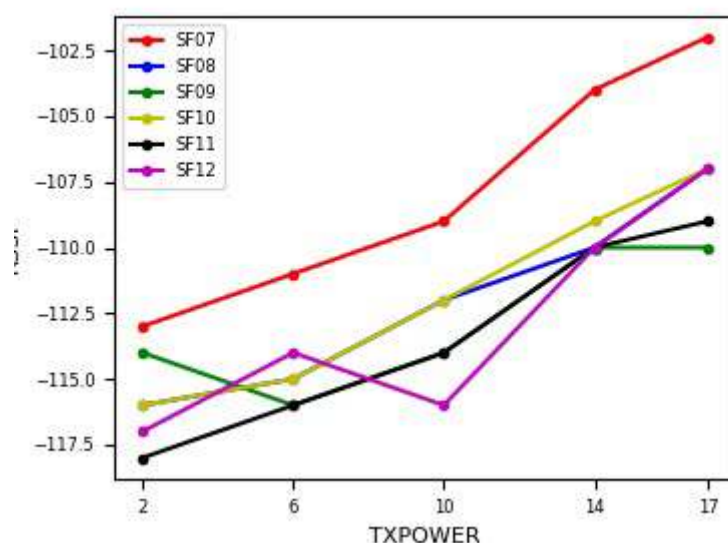


Figura 39 – Valores médios do RSSI - primeira bateria de testes outdoor

A relação sinal ruído nesta bateria obteve uma variação média entre 9,96 (SF08,txp17) de média mais alta e a pior de 0,63 (SF08,txp17). Não foi encontrado um padrão, ocorrendo uma alta variação de eficiência em cada SF e potência, e em algumas situações não ocorre uma melhora de eficiência em uma potência mais alto no mesmo SF mostrado no gráfico da Figura 40.

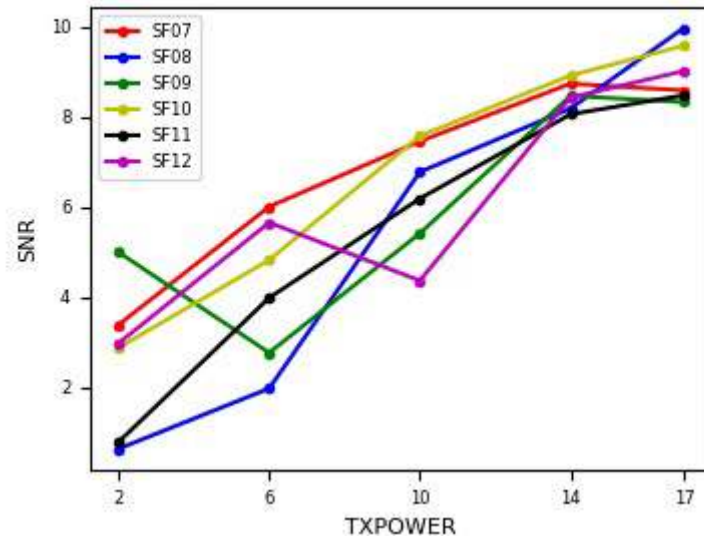


Figura 40 – Valores médios do SNR - primeira bateria de testes indoor

A perda ou recebimento de mensagens com erros nos parâmetros definidos foi muito baixa nessa bateria. As configurações de SF e potência menos eficientes (SF08, txp02 e SF12, txp 02,17) receberam 96 de 100 mensagens sem erro, as demais variações conseguiram receber entre 97 e todas as 100 mensagens sem erros; destacando o SF 10 por não ocorrer perda/erro em nenhuma mensagem transmitida nas txp definidas para comparação e no SF07 apenas na potência 02 ocorreu perda/erro de uma mensagem. A Figura 41 contém um gráfico mostrando esses resultados.

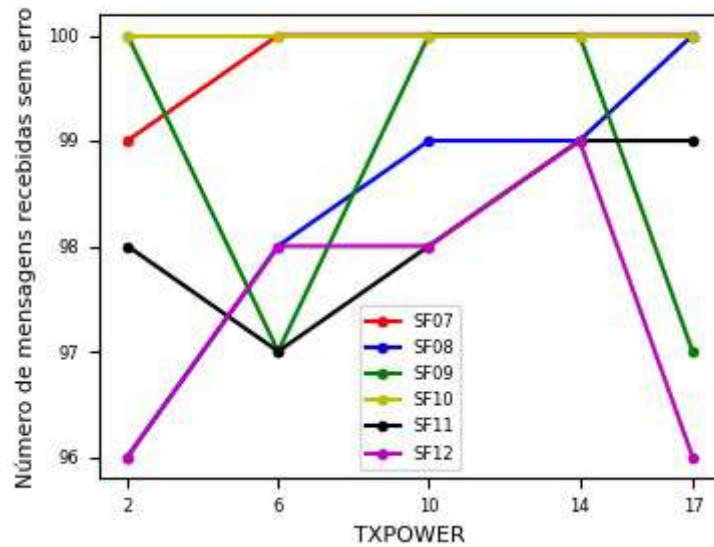


Figura 41 – Número de mensagens recebidas sem erro - primeira bateria de testes outdoor

Em geral a perda de mensagens em todas as configurações testadas (SF 07 até o 12 e TXP entre 02 e 17 em cada SF) foi muito baixa, o pior resultado ocorreu no SF12 com a perda de 3% das mensagens (48 de 1600 mensagens) os demais SF obtiveram entre 98 e 99% de mensagens recebidas sem erros, mostrado na Figura 42.

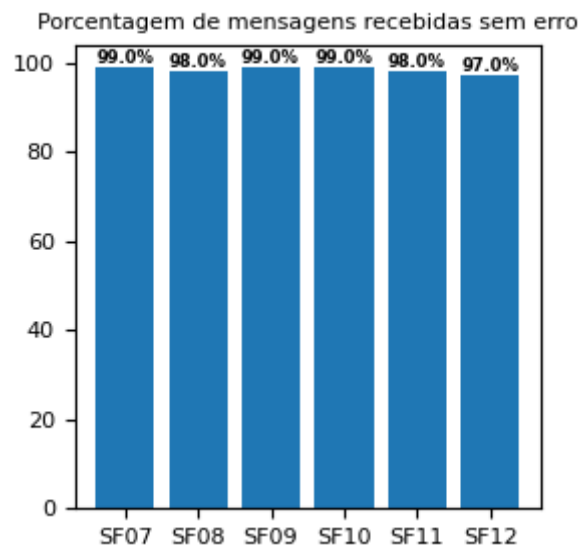


Figura 42 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - primeira bateria de testes outdoor

### 5.2.2 Segunda bateria de testes Outdoor - 1,2 quilômetro

Nesta bateria de testes outdoor a média dos valores de RSSI ficou entre -121 como pior média ocorrendo em seis configurações diferentes e a melhor média de -111 SF07 e

TxP 17. Em relação ao RSSI o SF07 obteve as melhores médias em TXP 06,10,14 e 17; em TXP02 obteve também o melhor resultado(-118) junto com SF08 e 09 enquanto os SF10,11 e 12 obtiveram a média de -121. Nas demais configurações ocorreu uma variação mostrada no gráfico da Figura 43.

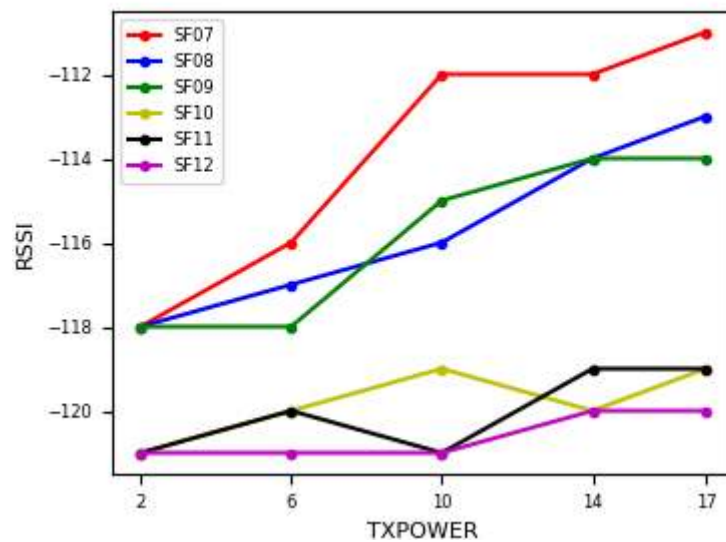


Figura 43 – Valores médios do RSSI - segunda bateria de testes outdoor

Sobre os resultados obtidos da SNR a pior média foi de -14,38(SF11,txp02) e a melhor obtida foi de 3,63 (SF09,txp17). O SF09 obteve as melhores médias em TXP06,10,14 e 17; e obteve a segunda melhor média em TXP02. Nos demais SF ocorre uma grande variação nas posições em cada TXP conforme Figura 44.

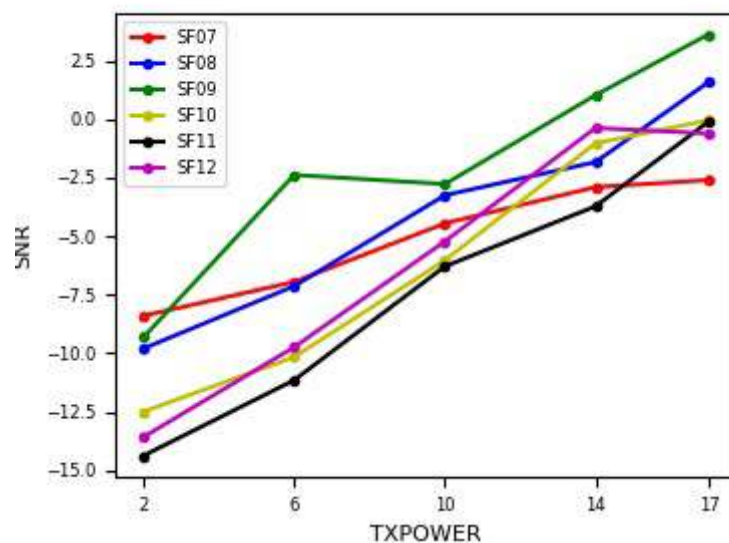


Figura 44 – Valores médios do SNR - segunda bateria de testes outdoor

Nas mensagens recebidas sem erro, esta bateria passa a apresentar perdas bem altas em algumas configurações. A configuração menos eficiente nessa bateria de testes(SF07,TxP10) conseguiu transmitir e receber com êxito apenas 10 mensagens de 100. No SF07 as potências de transmissão 02 e 06 transmitiram com êxito 13 e 19 pacotes. Também em SF08 e taxa de energia 02, ocorreu uma perda de 36 pacotes de 100; nas demais configurações comparadas a variação de mensagens recebidas ficou entre 84 mensagens e 100 mensagens em várias configurações; a Figura 45 apresenta um gráfico com esses resultados.

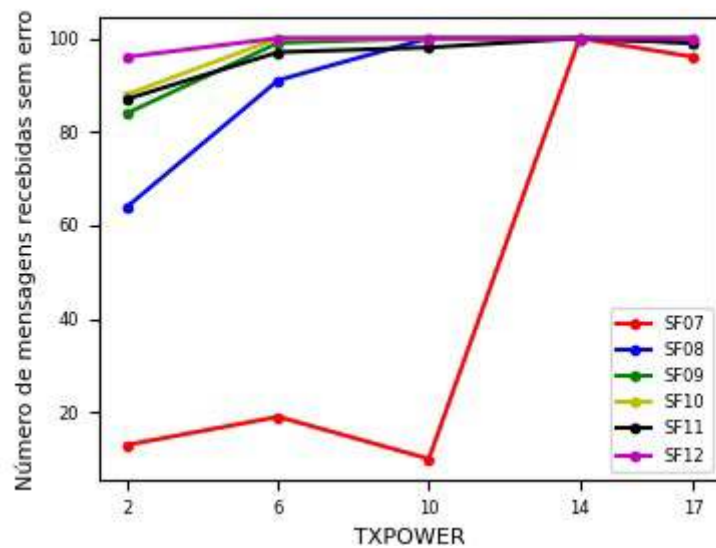


Figura 45 – número de mensagens recebidas sem erro - segunda bateria de testes outdoor

No percentual de mensagens recebidas sem erros em todas as configurações testadas (SF de 7 a 12 e txpower de 2 a 17, enviando 100 mensagens em cada configuração), como na amostragem detalhando algumas taxas de energia específicas do gráfico da Figura 46, o SF 07 foi o SF com menor porcentagem de mensagens recebidas sem erros alcançando 63%; nos outros SF a porcentagem ficou entre 95%(SF08) chegando a 100%(SF12) de 1600 mensagens transmitidas.

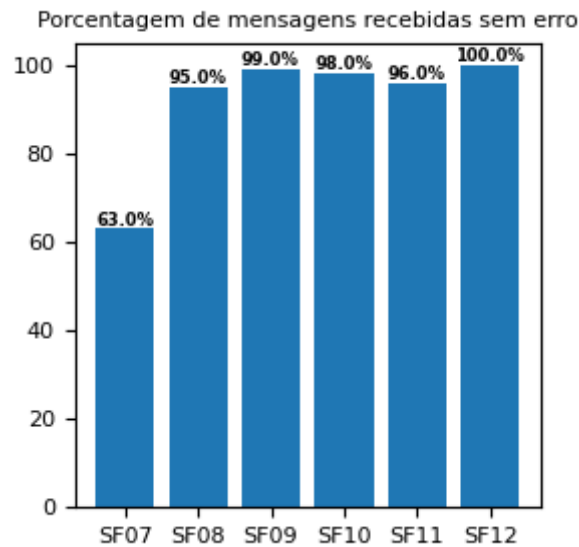


Figura 46 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - segunda bateria de testes outdoor

### 5.2.3 Terceira bateria de testes Outdoor - 1,58 quilômetro

Os valores de média do RSSI sofreram uma variação entre -121 no SF12 nas cinco variedades de taxa de energia definidas e o melhor resultado obtido é de -111 no SF07 em txp 14 e 17. O SF07 obteve as melhores médias em todas as potências definidas mostradas na Figura 47.

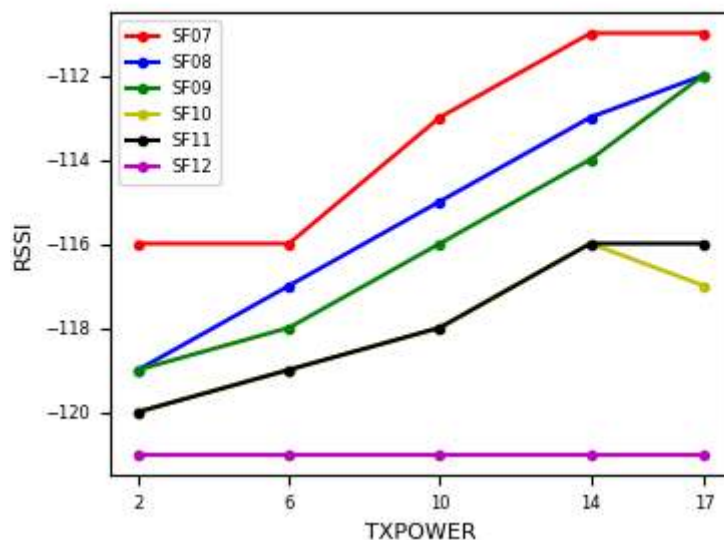


Figura 47 – Valores médios do RSSI - terceira bateria de testes outdoor

A média dos resultados obtidos da SNR tem como resultado mais baixo -14,70 (SF12,txp02) e mais alto de 7,09(SF09,txp17). Na Figura 48 fica evidente a menor efici-

ência na média dos SNR no SF12.

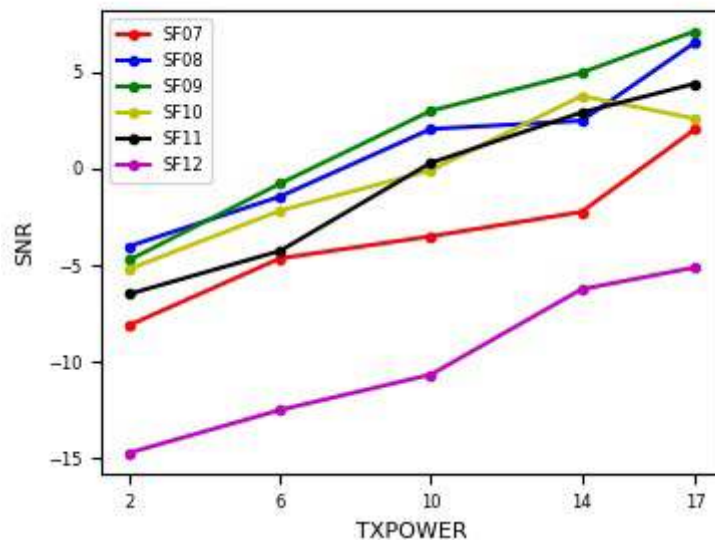


Figura 48 – Valores médios do SNR - terceira bateria de testes outdoor

O número de mensagens recebidas sem erro teve uma variação bem alta entre o pior resultado (5 mensagens recebidas sem erros no SF07 e TxP02) e os resultados de várias configurações que não ocorreram erros (100 mensagens de 100 recebidas). Além do pior resultado geral nas taxas de energia 06,10 e 14 o SF07 obteve o pior rendimento. A Figura 47 contém um gráfico para visualizar esses resultados.

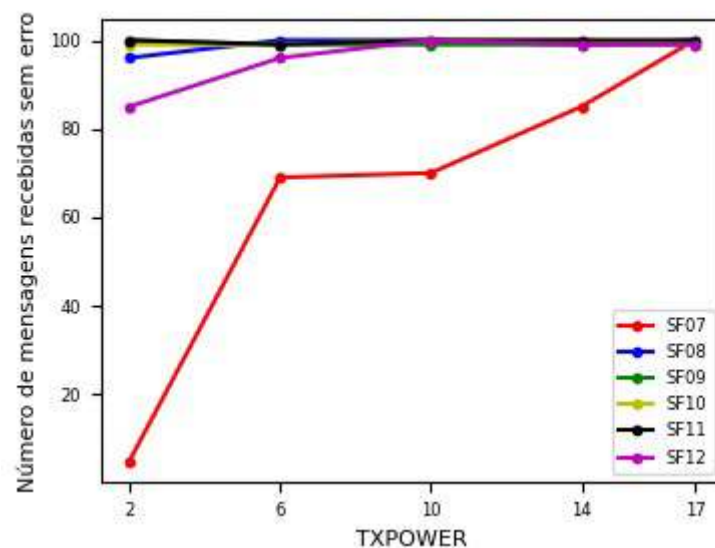


Figura 49 – número de mensagens recebidas sem erro - terceira bateria de testes outdoor

Como na segunda bateria de testes outdoor, na terceira bateria comparando a porcentagem de mensagens recebidas sem erro (de SF de 7 a 12 e txpower de 2 a 17,

enviando 100 mensagens em cada configuração, totalizando 1600 mensagens por SF), o SF07 obteve uma porcentagem de sucesso muito abaixo dos demais (66%) comparando com os demais que variaram entre 95% e 100%(SF11).

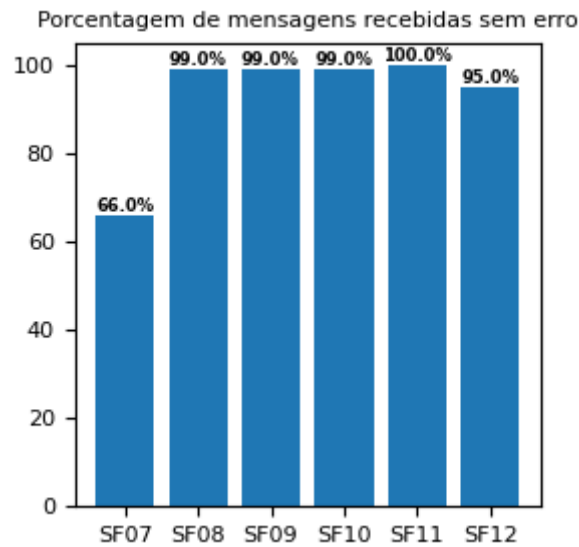


Figura 50 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - terceira bateria de testes outdoor

#### 5.2.4 Quarta bateria de testes Outdoor - 2 quilômetros

Os valores de média do RSSI obtidos nessa bateria foram entre -122 como pior resultado em várias configurações até -116(SF07,txp14 e 17), e a falta de resultado em SF07 com txp02 por não ter ocorrido nenhum recebimento de mensagem mostrado na Figura 51.

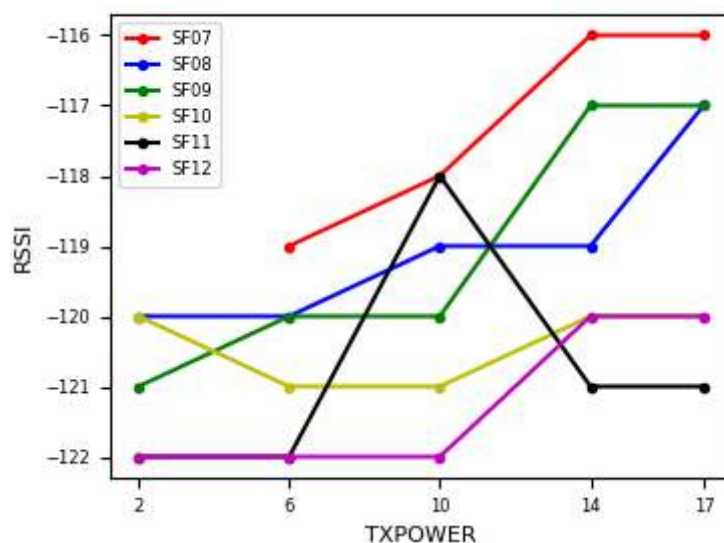


Figura 51 – Valores médios do RSSI - quarta bateria de testes outdoor



As médias de SNR obtidas ficaram entre -13,41 (SF12,txp02) e 0,63(SF12,txp17) e com várias alterações entre melhor e pior em cada TxP não ocorrendo nenhum padrão conforme pode ser visualizado na Figura 52.

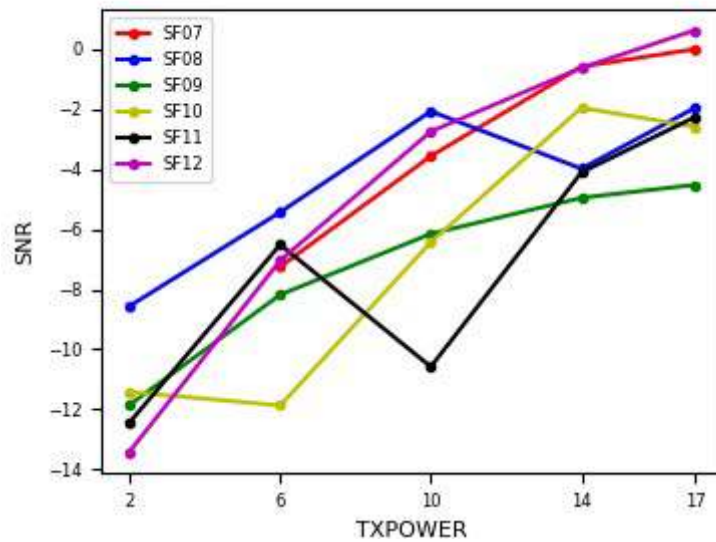


Figura 52 – Valores médios do SNR -quarta bateria de testes outdoor

Sobre o número de mensagens recebidas sem erros o intervalo foi de 0 como pior resultado em SF 07 e txp 02 até receber todas as 100 mensagens sem erro no SF12 em txp 10,14 e 17. Apesar da alta variação quando comparando todos os SF, o SF 12 obteve o melhor resultado em todos os txp definidos(02,06,10,14 e 17) entre 93 e 100, na figura 55 é mostrada a variação entre os resultados em diversas configurações e a maior eficiência do SF 12 nessa bateria.

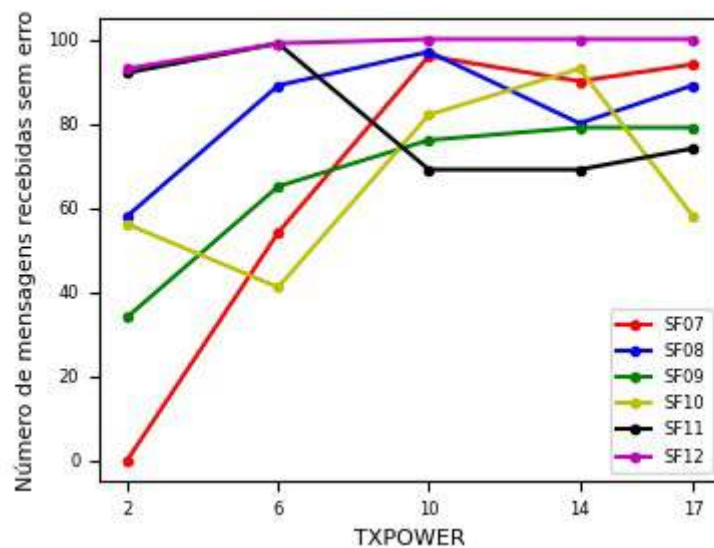


Figura 53 – Número de mensagens recebidas sem erro - quarta bateria de testes outdoor

Nesta bateria de testes as perdas de mensagens e erros ocorreram em maior quantidade com exceção do SF12, onde porcentagem de mensagens recebidas sem erro ficou em 99%; nos demais SF a variação ficou entre 56%(SF07) e 81%(SF08), na Figura 54 é possível observar esses resultados.

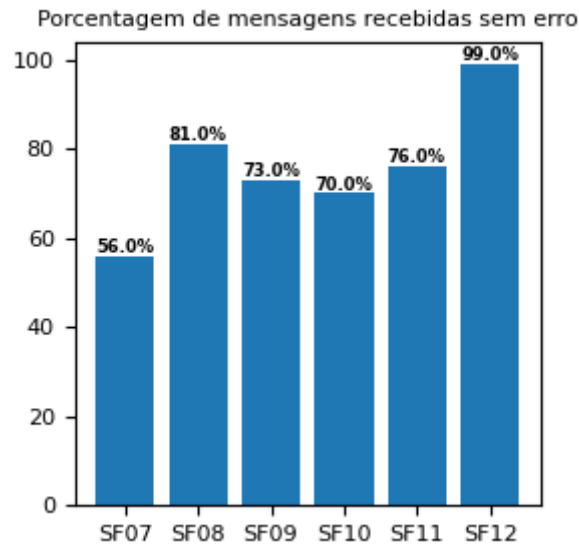


Figura 54 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - quarta bateria de testes outdoor

### 5.2.5 Quinta bateria de testes Outdoor - 4 quilômetros

Na quinta bateria de testes outdoor ocorreram transmissões bem-sucedidas em apenas quatro configurações: SF10 em TXP17, SF12 em TXP 10, 14 e 17. A média dos valores de RSSI obtidas foram: -16,69 em SF10 TXP17, -121 em SF12 TXP10, -123 TXP14 e -123 TXP17; Figura 55 contém o gráfico demonstrando os resultados do RSSI.

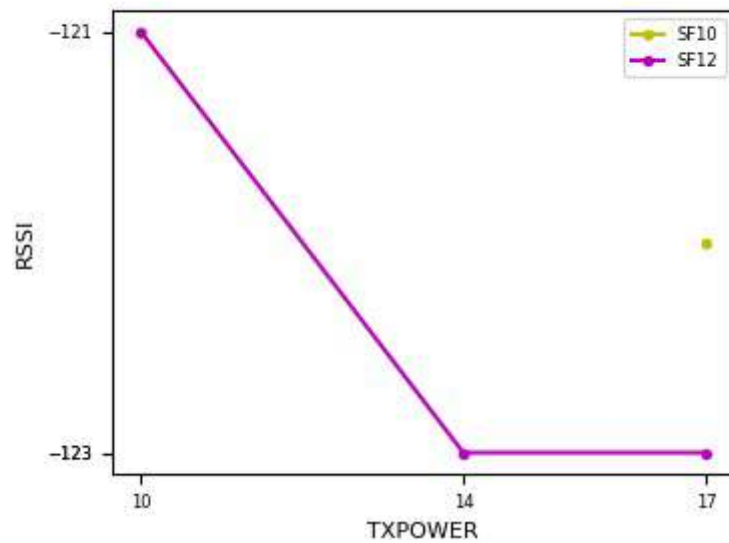


Figura 55 – Valores médios do RSSI -quinta bateria de testes outdoor

A média dos valores de SNR obtido nessa bateria de testes foram os seguintes: -16,69 em SF10 TXP17, -20,44 SF12 TXP10, -18,64 TXP14 e -16,85 TXP17, esses resultados estão demonstrados na figura 56.

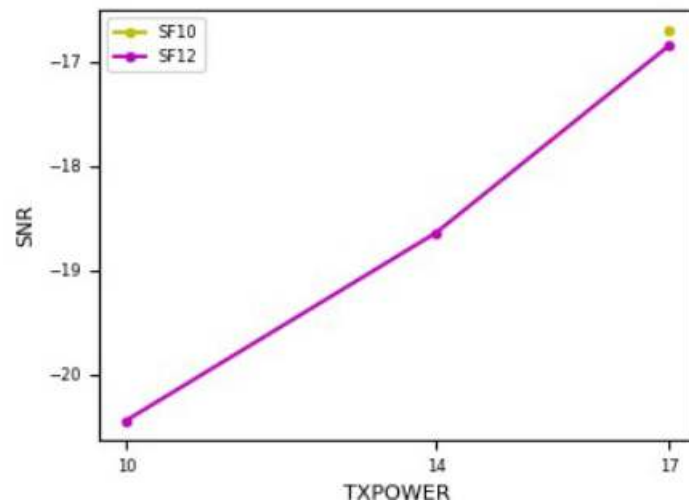


Figura 56 – Valores médios do SNR - quinta bateria de testes outdoor

O número de mensagens recebidas sem erro em SF10 e TXP17 foi de 4 mensagens, em SF12 e TXP10 novamente 4 mensagens, TXP14 foram 70 mensagens e TXP17 96 mensagens.

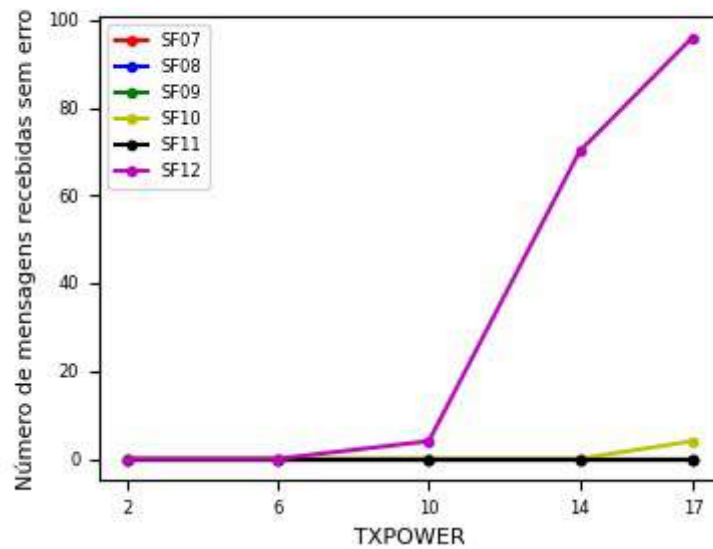


Figura 57 – Número de mensagens recebidas sem erro - quinta bateria de testes outdoor

Mensagens recebidas sem erro, ocorreram apenas em transmissões nos SF10 e SF12. No SF 10 apenas 4 mensagens foram recebidas sem erro não chegando a 1% de sucesso e o SF12 obteve uma porcentagem de sucesso na transmissão de 23%.

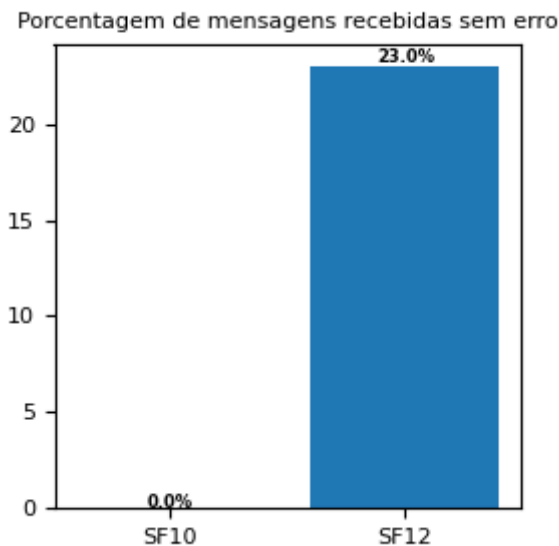


Figura 58 – Porcentagem de mensagens recebidas sem erro por SF - quinta bateria de testes outdoor

### 5.3 Análise dos Resultados

Conforme mencionado anteriormente na metodologia, as métricas para análise dos resultados são RSSI, SNR e principalmente o número de mensagens recebidas sem erros. Analisando esses resultados nos testes *Indoor* e *Outdoor*, é possível validar o sucesso das

transmissões em diferentes configurações de SF e potência de transmissão, procurando as configurações mais interessantes em cada cenário no que diz respeito ao sucesso de transmissão e eficiência energética.

### 5.3.1 Análise dos Resultados dos testes *Indoor*

Nos testes Indoor analisando os números relacionados ao RSSI, a configuração usando o SF7 obtém os valores médios mais altos, com exceção da potência de transmissão de 2dBm na primeira e terceira bateria de testes o SF07 conseguiu os melhores indicadores. Outro padrão encontrado em cada SF nos testes Indoor e o aumento do resultado de RSSI com o aumento da potência de transmissão (ocorrendo algumas exceções).

Sobre a relação sinal-ruído, os testes da primeira bateria foram mais próximos do padrão encontrado no RSSI, aumentando a potência de transmissão, eleva-se os resultados médios de dBm do SNR em cada SF (com algumas exceções); porém no segundo e terceiro testes esse padrão não ocorreu normalmente e os resultados não seguiram uma ordenação; em relação aos SFs também não ocorreu o padrão esperado de piora da SNR nos Sfs superiores.

O número de mensagens recebidas sem erro nas potências de transmissão definidas (2,6,10,14 e 17dBm) para cada SF obtiveram alta taxa de sucesso. Na primeira bateria de testes a configuração com pior resultado transmitiu 95 mensagens de 100 sem nenhum erro na segunda bateria os piores resultados ficaram em 99/100 e na terceira apenas uma configuração não transmitiu todos os pacotes com êxito.

Na compilação envolvendo todas as mensagens trocadas nas potências de transmissão entre 2dBm e 17 dBm (total de 1600 mensagens), a variação ocorrida foi de 3% nas três baterias ficou entre 100% e 97%, destacando o SF07 que obteve 100% em todas as baterias de testes *indoor*.

Para aplicação da tecnologia em um ambiente semelhante ao do cenário *indoor*, os protótipos LoRa desenvolvidos para esse trabalho se mostraram altamente funcionais em todas as configurações testadas. Buscando a maior eficiência na transmissão e consumo de energia a configuração com o SF07 e potência de transmissão de 2 dBm baseado nos resultados se torna a mais recomendada; nos testes obteve 100% de mensagens recebidas com a potência de transmissão mais econômica em relação ao consumo de energia, com o SNR positivo possivelmente possibilitando trabalhar com larguras de banda mais alta (que podem causar a piora do SNR) e do menor tempo de transmissão devido ao SF7. A possibilidade de funcionamento em locais Indoor com maior interferência e distâncias superiores as testadas é bem possível com essa configuração ou em SF mais altos e com maior potência na transmissão porém com maior consumo de energia.

### 5.3.2 Análise dos Resultados dos testes Outdoor

Nos resultados dos testes Outdoor houve uma variação maior de resultados em relação as mensagens recebidas sem erros, como esperado devido a questões como atenuação por distância, barreiras como prédios, casas, morros e o relevo da cidade.

A primeira bateria de teste outdoor(598 metros) gerou resultados semelhantes aos encontrados nos testes *indoor*, com exceção do SNR, onde o aumento da potência de transmissão subiu os valores em quase todas as configurações. Na média do RSSI o SF07 obteve os maiores valores em todas as potências de transmissão comparadas; o número de mensagens recebidas sem erros teve uma variação baixa entre as configurações menos eficientes(96 de 100 em SF12) e as mais eficientes recebendo 100 de 100 mensagens. A porcentagem de mensagens recebidas sem erro em cada SF em transmissões com potências entre 2dBm e 17dBm (1600 mensagens) o SF12 foi o menos eficiente transmitindo com sucesso 97% das mensagens, SF 07, 09 e 10 transmitiram com sucesso 99% das mensagens. A semelhança com os testes *indoor* nessa primeira bateria outdoor, demonstra que os protótipos desse trabalho e a tecnologia LoRa até 600 metros de distância é eficiente em diversas configurações, inclusive em configurações com potência de transmissão mais baixa necessitando de menos energia.

Na segunda bateria de testes (1,2 quilômetro), os valores de RSSI das mensagens recebidas sem erros (nas potências de transmissão comparadas), continua sendo maior no SF07, e na maioria dos SF o aumento da potência de transmissão sobe os valores de RSSI nas mensagens recebidas; como na primeira bateria o aumento da potência de transmissão ocasionou o mesmo efeito de aumento dos valores da SNR, a maioria das configurações não consegue valores positivos na média de SNR das transmissões concluídas com sucesso. O comparativo com as potências de transmissão do número de mensagens recebidas sem erros, começa a demonstrar um número maior de perdas perante os resultados dos testes Indoor e a primeira bateria Outdoor, principalmente em configurações com potências mais baixas e nos dois mais baixos SF, com destaque negativo para o SF07 configurado com potência de 2dBm concluindo com êxito apenas 13 transmissões; com as potências em 14 e 17 dBm o número de mensagens recebidas em todos os SF são próximos de 100, sendo o pior resultado de 4 perdas em SF07 e potência de 17dBm. Na relação de porcentagem de mensagens recebidas por SF somando todos as potências de transmissão, é nítida a menor eficiência do SF07 com 63% de sucesso perante os outros SF, com a porcentagem de sucesso entre 95% chegando até 100% no SF12.

Os resultados da terceira bateria(1,58 quilometros) foram semelhantes aos da segunda, provavelmente pelo aumento de apenas 380 metros, em todos as métricas (principalmente RSSI e SNR). O número de mensagens recebidas sem erros também foi semelhante aos da segunda bateria, as perdas na potência mais baixa (2dBm) foram ainda maiores no SF07 e menores nos demais SF; nas demais potências comparadas o SF07

obteve uma melhora gradativa, se equiparando aos demais Sfs na potência de 17 dBm. A porcentagem de mensagens recebidas sem erros coloca novamente o SF07 com menor sucesso(66%) e nos demais SF ocorreu variação bem semelhante a bateria anterior entre 95% até 100%(no SF11).

Os resultados da quarta bateria de testes(2 quilômetros) não seguem os mesmos padrões das baterias de testes anteriores. Os valores do RSSI não seguem na maioria das vezes uma crescente com aumento da potência de transmissão, mas novamente o SF07 obtém os valores mais altos em quase todas potências comparadas, com exceção de 2 dBm(nenhuma mensagem foi transmitida com sucesso nessa configuração). Nenhum SF tem valores da SNR destacado em todas as configurações de potência e a potência mais alta, não aumenta o valor da SNR sempre. A comparação entre os SF em determinadas potências de transmissão em relação o número de mensagens recebidas sem erro, demonstra a maior eficiência do SF12 em todas as potências comparadas alcançando resultados entre 93 mensagens recebidas (2dBm) e 100 mensagens enquanto no SF07, não é transmitida nenhuma mensagem sem erros em 2dBm, ocorrendo uma melhora crescente com o aumento de potência, chegando até 94 mensagens transmitidas com sucesso em 17dBm. A porcentagem de mensagens recebidas sem erro nessa bateria coloca novamente o SF07 como pior SF alcançando 56% de mensagens transmitidas sem erros, o SF12 transmitiu 99% das mensagens com sucesso sendo o SF mais eficiente; os demais ficaram entre 76% e 81%, porcentagens bem abaixo dos testes anteriores.

A quinta bateria de testes (4 quilômetros) como esperado por causa da maior distância, gerou menos resultados e não obteve sucesso para transmitir mensagens com êxito em quase todas as configurações. Os valores de RSSI coletados nessa bateria foram entre -121 e -123, valores próximos aos mais baixos da quarta de testes. A SNR retornou valores abaixo dos piores da bateria anterior, entre -16,49 e -20,44, o que indica um alto índice de ruídos somados a atenuação natural por causa da maior distância entre transmissor e receptor, ocasionando o baixo nível de mensagens transmitidas com sucesso. Apenas dois SF efetuaram transmissões com sucesso; no SF10 com a potência mais alta do teste 4 de 100 mensagens foram recebidas sem erros. O SF12 efetuou 4 de 100 transmissões em 10dBm e 96 de 100 transmissões em 17 dBm. A porcentagem de mensagens transmitidas ficou abaixo de 0,1% (total de 4 mensagens de 1600) no SF10, no SF12 a porcentagem de mensagens recebidas sem erros foi de 23% devido as transmissões que ocorreram a partir de 10 dBm.

A análise dos resultados dos testes outdoor com os protótipos e configurações fixas desse trabalho demonstrou que até 600 metros qualquer configuração é bem funcional, o que propicia configurações usando os fatores de SF mais baixos para reduzir o tempo de transmissão e potências mais baixas visando menor consumo de energia. Em distâncias entre 1,2 e 1,58 quilômetro, a eficiência do SF07 em potências menores é bem reduzida o

que acaba gerando uma escolha entre menor tempo de transmissão usando SF07 e uma potência mais alta ou, usar um SF mais alto com maior tempo de transmissão mas com potência mais baixa privilegiando a economia de energia.

A quarta bateria de testes deixa mais evidente a questão da escolha entre tempo de transmissão e gasto de energia, mas destacando em todas as potências o SF12 devido ao maior tempo no ar.

A última bateria de testes novamente coloca o SF12 como o mais eficiente para transmissões mais distantes, mas com funcionamento apenas em potências mais altas, os demais SF mesmo nas potências mais altas não se mostraram funcionais.

A qualidade dos componentes dos protótipos pode ter interferido nos resultados, com o uso de equipamentos mais robustos os resultados obtidos poderiam ser mais eficientes principalmente nas duas últimas baterias *outdoor*, mas um dos objetivos deste trabalho é trabalhar com um protótipo barato e funcional que possivelmente não possa alcançar distâncias muito maiores que as testadas.

### 5.3.3 Consumo de Energia nos Testes

Em todos os testes deste trabalho o powerbank ASUS ZenPower com capacidade de 10050mAh foi utilizado como fonte de energia para o protótipo emissor, sem executar recarregamento.

No final do último teste apenas um dos quatro leds (para mostrar a carga de energia) do powerbank estava apagado; seguindo os valores do datasheet do chip usado nesse trabalho, uma bateria de 10050mAh pode alimentar um chip SX1276 trabalhando em potências superiores a 17 dBm de forma ininterrupta (transmitindo a todo momento sem entrar em *Standby* ou *sleep*), por quase 5 dias e em potência entre 7 dBm e 12dBm, por aproximadamente 21 dias. Apesar da inexatidão do medidor de carga da bateria, os valores de consumo do *datasheet* são bem viáveis.



## 6 Conclusão e Trabalhos Futuros

A necessidade de transmitir informações nas mais diversas formas têm gerado uma busca por meios de transmissão mais eficientes. Surgiu o aumento nas aplicações que usam redes de sensores sem fio e IoT, daí a necessidade de tecnologias LPWAN como LoRa.

Os resultados coletados neste trabalho comprovam a funcionalidade da tecnologia LoRa para transmissão de dados em distâncias de até 4 quilômetros sem linha visada (é possível que a comunicação ocorra em distâncias maiores mas o escopo do trabalho e questões de segurança definiram essa distância como a mais longa a ser testada). Como toda tecnologia LPWAN, LoRa tem como suas características, baixa taxa de transmissão, baixo consumo de energia e alto alcance; essas características tornam o LoRa uma excelente escolha para muitas aplicações envolvendo redes de sensores sem fio e IoT.

Os testes deste trabalho mostraram possibilidades da utilização da tecnologia em diferentes cenários, para diversos tipos de aplicação que não necessitem de uma alta taxa de transmissão. Os resultados dos testes *indoor* demonstram a possibilidade da aplicação em locais fechados com várias barreiras físicas, operação de outros equipamentos e transmissões (gerando ruídos) e principalmente para ambientes fechados onde não seja possível o uso de redes cabeadas, onde redes wi-fi sejam suscetíveis aos problemas citados anteriormente que o LoRa superou; aplicações em escolas, órgãos públicos e ambientes hospitalares (como no trabalho do autor Ribeiro [4]) são possivelmente funcionais baseando-se nos testes *indoor*.

Nos testes *outdoor* foram destacadas as possibilidades de uso em aplicações urbanas (smart cities), com algumas limitações em relação a configurações dependendo da distância e disponibilidade de energia; a possibilidade de aplicações em fazendas e áreas rurais também é possível graças ao alto alcance mesmo em transmissões sem linha de visão.

Para este trabalho foram desenvolvidos dois protótipos de baixo custo, que desempenharam bem suas funções; o trabalho com estes protótipos possibilitou a comprovação empírica do funcionamento da tecnologia estudada nas condições de configuração limitadas com enfoque nas distâncias, fatores de espalhamento e consumo de energia e levantou algumas questões para trabalhos futuros. Essas questões podem ser divididos em quatro grupos visando possíveis trabalhos futuros envolvendo LoRa.

O primeiro grupo está relacionado a mudanças no hardware usado e testes com outros hardwares LoRa. Como o uso de antenas com dBi maior ou possibilidade de uso de antenas unidirecionais podem aumentar a taxa de sucesso de transmissão em configurações onde os números foram baixos e aumentar à distância de transmissão.

O segundo grupo é uma expansão dos testes realizados nesse trabalho, mas testando configurações mais diversas das configurações LoRaPHY além do SF e potência de transmissão. Os principais objetivos a serem alcançados com essas modificações são a comparação de taxa de transmissão teórica máxima com as obtidas em um teste de campo, relação do aumento dessas taxas com porcentagem de sucesso nas transmissões e distância e a possibilidade de redução de erros e possíveis problemas com o aumento da taxa de codificação.

No terceiro grupo a intenção é usar a tecnologia LoRa em uma rede LoRaWAN, adquirindo ou montando um *gateway* LoRaWAN, desenvolvendo um servidor (físico ou em nuvem) para se comunicar com uma aplicação teste desenvolvida. Uma das possibilidades também é o estudo para uso da "The Things Network" como servidor e a possibilidade de disponibilizar e usar *gateways* públicos da TTN.

O último grupo envolve questões de segurança de dados transmitidos em uma rede LoRa; testes sobre captura de mensagens e voltados a criptografia aplicada no LoRa pode ser executados e soluções para o aumento da segurança em transmissões LoRa e de uma rede LoRaWAN.

# Referências

- [1] KUROSE, J. F. e ROSS, K. - Redes de Computadores e a Internet - 6<sup>a</sup> Ed., Pearson, 2013.
- [2] FENG, X.; LAURENCE, T. Y.; LIZHE, W. Internet of Things. International Journal of Communication Systems, v. 25, n. 9, p. 1101–1102, 2012.
- [3] ORTIZ, F.M. Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a internet das coisas. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - UFRJ ,COPPE, Rio de Janeiro, 2018.
- [4] RIBEIRO, J.M.T. Uma aplicação da tecnologia LoRa em um ambiente hospitalar. Orientador: Richard Demo Souza. 2019. 79 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/197683>. Acesso em: 31 jan. 2021.
- [5] PATEL, Dhaval;WON,Myounggyu. Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things. IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), jun. 2017.
- [6] BRANQUINHO, O. C; REGGIANI, N; ANDREOLLO, A. G. Redes de comunicação de dados sem fio – uma análise de desempenho. ISA SHOW SOUTH AMERICAN Feira Sul-Americana e 5º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação., São Paulo, Brasil, 2005.
- [7] SILVA, L.F.B. Método para aferição de distância entre nós sensores baseado em RSSI. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, Brasil, 2014.
- [8] PARAMESWARAN, A.; HUSAIN, M.I; UPADHYAYA, S. Is RSSI a reliable parameter in sensor localization algorithms: an experimental study. Department of Computer Science and Engineering State University of New York at Buffalo, Buffalo NY- 14260, USA 2009
- [9] AHN, Hyo-Sung; KO, Kwang Hee. Simple pedestrian localization algorithms based on distributed wireless sensor networks. IEEE Transactions on Industrial Electronics, [s. l.], v. 56, ed. 10, p. 4296 - 4302, 10 out. 2009.
- [10] LUOMALA, J.; HAKALA, I.; "Towards adaptive localization in wireless sensor networks," 2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS), 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/UPINLBS.2012.6409778.
- [11] RAJA, S.P.; DHILIPHAN, R.T.; VIVEK P.R.; “Internet of Things: Challenges, Issues

- and Applications” Journal of Circuits, Systems and Computers Vol. 27, No. 12, 1830007, 2018. <https://doi.org/10.1142/S0218126618300076>
- [12] ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G.; ‘The Internet of Things: A survey”, Computer Networks, v. 54, n. 15, pp. 2787 - 2805, 2010. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- [13] SANT’ANA, J.M.S; Redes LoRaWAN: implantação e desenvolvimento de aplicações. Orientador: Arliones Stevert Hoeller Jr. 2017. 67 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Brasil, 2017.
- [14] LINK LAB’S. “A Comprehensive Look At Low Power, Wide Area Networks”. Disponível em:<https://www.link-labs.com/thank-you-lpwan?submissionGuid=97107daa-8a01-473e-9521-c356134ec47b>, 2016.
- [15] Sigfox “Sigfox—The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)”.<https://www.sigfox.com/en> (acessado em março de 2020).
- [16] VEJLGAARD, B.; LAURIDSEN, M.; NGUYEN, H.; KOVACS, I.Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M. “Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT”. In Proceedings of the 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Sydney, Australia,; pp. 1–5. 4–7 June 2017
- [17] SUN W.; CHOI M.; CHOI S. “IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz”. Journal of ICT Standardization. 1. 83-107. 2013.
- [18] D. Halasz. “Sub 1 GHz license-exempt PAR and 5C”. IEEE 802.11-10/0001r13, Jul. 2010, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/10/11-10-001-13>.
- [19] Vegt, R. “Potential compromise for 802.11ah use case document”. IEEE 802.11-11/0457r0, Mar. 2011, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/11/11-11-0457-00-00ah-potentialcompromise-of-802-11ah-use-case-document.pptx> (Acessado em outubro de 2019)
- [20] LORATM-ALLIANCE. “LoRaWAN Specication V1.0.2”. Disponível em: <https://www.lora-alliance.org/>, 2016.
- [21] RAMOS, M.H.R. Uso de uma rede LoRaWAN em um sistema de gerenciamento de lixo. Orientador: Adriano Augusto de Moraes Sarmiento. 2019. 42 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia da Computação) - Programa de Graduação em Engenharia da Computação do Centro de Informática (CinUFPE) da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2019.
- [22] SILVA, G.A. Análise da tecnologia de conectividade em longa distância LoRa® para a Internet das Coisas. Orientador: Marco Aurélio Spohn. 2019. 70 p. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Federal da Fronteira Sul Campus Chapecó, Brasil, 2019.

- [23] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, Sept. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [24] Semtech, "Lora and lorawan: A technical overview," 20. [Online]. Disponível em: [https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\\_and\\_LoRaWAN\\_-\\_A\\_tech\\_Overview\\_-\\_Downloadable.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN_-_A_tech_Overview_-_Downloadable.pdf)
- [25] RAZA, U., KULKARNI, P., SOORIYABANDARA, M. "Low Power Wide Area Networks: An Overview", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, pp. 855-873, Secondquarter 2017. ISSN: 1553-877X. doi:10.1109/COMST.2017.2652320.
- [26] J. de Carvalho Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic and A. L. L. Aquino, "LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities," 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), 2017, pp. 1-6.
- [27] MAZIERO, L., BARRIQUELLO, C., MARCHESAN, T., CARLOTO, F., VIZZOTTO, W., (2018) "Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia" In SEPOC 2018, Santa Maria, RS
- [28] BOR, M., VIDLER, J., ROEDIG, U. "LoRa for the Internet of Things". In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN '16*, pp. 361- 366, USA, 2016. Junction Publishing.
- [29] Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. (2015) Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRa™ . In: Atanasovski V., Leon-Garcia A. (eds) *Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures. FABULOUS 2015. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 159. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27072-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27072-2_7)
- [30] ANATEL (Brasil). Ato nº 6506 de 27 de agosto de 2018. Brasil, 2018. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2018/1205-ato-6506>. Acesso em: 29 out. 2020.
- [31] SEMTECH CORPORATION. "LoRa™ Modulation Basics AN1200.22". Disponível em: <https://www.semtech.com/uploads/documents/>, 2015.
- [32] SEMTECH CORPORATION. "SX1276-7-8-9 Datasheet". Disponível em: [https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF\\_Fkp\\_gp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE](https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkp_gp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE), 2020.
- [33] MOLANO ORTIZ, F., ALMEIDA, T., FERREIRA, A., COSTA, L. (2019). Caracterização de Desempenho de uma Rede LoRa em Ambientes Urbanos: Simulação vs. Prática. In *Anais do III Workshop de Computação Urbana*, (pp. 167-180). Porto Alegre: SBC. doi:10.5753/courb.2019.7476

- [34] SEMTECH CORPORATION. "SX1276-7-8-9 Guide". Disponível em: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF<sub>F</sub>kp<sub>gp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE</sub>>, 2020.
- [35] SCHWAB, A.L. CRIAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA PROJETOS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. Orientador: Vandersilvio da Silva. 2020. 78 p. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Feevale, Brasil, 2020.
- [36] MISTRY, Sandeep. Arduino-LoRa. Ottawa, 2019. Disponível em: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>. Acesso em: 21 fev. 2021.
- [37] PORTAL IFSULDEMINAS - Campus Inconfidentes. [S. l.], [2018]. Disponível em: <https://portal.ifs.ifsuldeminas.edu.br/>. Acesso em: 10 jul. 2020.