



ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE SEM-FIO DE BAIXA POTÊNCIA E LONGO ALCANCE PARA A INTERNET DAS COISAS

Fernando Molano Ortiz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski
Costa

Rio de Janeiro
Março de 2018

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE SEM-FIO DE BAIXA
POTÊNCIA E LONGO ALCANCE PARA A INTERNET DAS COISAS

Fernando Molano Ortiz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

Prof. Pedro Braconnot Velloso, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Molano Ortiz, Fernando

Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a internet das coisas/Fernando Molano Ortiz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 55 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 52 – 55.

1. Internet das Coisas. 2. Redes de Sensores. 3. Análise de Redes. 4. Desempenho. I. Costa, Luís Henrique Maciel Kosmalski. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha família.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe Edilsa, minha avó Ace, e minha tia Nuria, que me apoiaram constantemente com as suas palavras, conselhos, e experiência, que têm-se feito sentir muito perto de mim. Sem importar a distância, me deram impulso para não desistir dos meus projetos e ambições.

Agradeço ao pessoal do laboratório, Carlos Henrique de Oliveira, Dianne Medeiros, Thales Almeida, Martin Andreoni, Diogo Menezes, João Batista, Pedro Cruz, Ana Elisa, Hugo Sadok, Lucas Gomes e demais companheiros, que amavelmente me apoiaram e me ajudaram para o desenvolvimento dos meus trabalhos; além de contribuir na minha formação e motivação, agradeço pelos bons momentos compartilhados com eles no GTA.

Agradeço aos professores que participaram na minha formação, aos professores do GTA pela sua paciência e ajuda. Agradeço especialmente ao meu orientador Luís Henrique por me orientar e apoiar no meu mestrado, pela paciência e a confiança durante a orientação. Da mesma forma, agradeço aos professores Pedro Velloso e Marcelo Rubinstein pela participação na banca examinadora desta dissertação.

Agradeço aos funcionários do programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, Daniele, Marco, Maurício e Roberto, por serem atenciosos e sempre prestativos na secretaria do programa.

Agradeço aos meus amigos colombianos aqui no Brasil, todos contribuíram para alimentar positivamente nossos próprios trabalhos. Agradeço especialmente a Diana; a sua ajuda tem sido incrível. Aos amigos na Colômbia, que contribuíram com opiniões claras e sensatas para projetar o futuro, que me apoiaram e deram força e ânimo nos momentos difíceis. Por último e não menos importante, aos amigos brasileiros, da vida, da república... que me acolheram, brindaram a sua amizade, e torceram pelo meu sucesso; sou muito grato pelos momentos bons e ruins, todos fazem parte da minha aprendizagem diária.

Por fim, agradeço ao CNPq e à CAPES pela bolsa e financiamento desta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA REDE SEM-FIO DE BAIXA POTÊNCIA E LONGO ALCANCE PARA A INTERNET DAS COISAS

Fernando Molano Ortiz

Março/2018

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Atualmente, a disseminação de informações surgindo da digitalização de diferentes processos físicos envolvendo sensoriamento, processamento e comunicação nas cidades inteligentes (*smart cities*) tem gerado múltiplos desafios relacionados à participação ativa de dispositivos eletrônicos na sociedade e à geração de massas de dados. Assim, como esses dispositivos podem enviar as informações que são capturadas e processadas em grandes áreas, tornam-se um desafio por conta da quantidade de dispositivos que precisam ser implementados em uma rede. Diferentes tecnologias de comunicação sem-fio podem ser utilizadas. Este trabalho avalia a tecnologia de comunicação LoRa, proposta recente para redes de baixa potência e longo alcance. O desempenho da comunicação de nós baseados na tecnologia LoRa é analisado considerando a vazão, taxa de perda de pacotes, potência do sinal e relação sinal-ruído. O objetivo é caracterizar o comportamento da rede LoRa em função da distância entre os nós, mas também em função do fator de espalhamento, um parâmetro de modulação configurável na tecnologia LoRa. Os resultados são obtidos a partir de medições práticas no campus da UFRJ. Foi implementado um protótipo experimental em diferentes ambientes, mostrando que as variações de distância e as fontes de interferência influem no desempenho da rede. Por exemplo, os experimentos mostram que o aumento no fator de espalhamento de SF7 para SF11 reduz a taxa de perda em transmissões com distâncias de 2km, porém, tendo maior atraso na comunicação e uma taxa de transferência de dados menor.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PERFORMANCE ANALYSIS OF A LOW-POWER AND LONG-RANGE
WIRELESS NETWORK FOR INTERNET OF THINGS

Fernando Molano Ortiz

March/2018

Advisor: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Department: Electrical Engineering

Nowadays, the dissemination of information originating at the digitization of different physical processes involving sensing, processing and communication in smart cities has produced multiple challenges related to the inclusion of electronic devices in the society as well as the generation of big data. Thus, devices can send information that is captured and processed over large areas, they become a challenge because of the number of devices that need to be deployed across a network. Different wireless technologies can be used. This work evaluates LoRa communication technology, a recent approach of low-power long-range networks. The communication performance of LoRa nodes is analyzed considering the throughput, packet loss rate, signal strength, and signal-to-noise ratio. The objective is to characterize the behavior of the LoRa network as a function of the distance between the nodes, but also as a function of the spreading factor, a configurable modulation parameter in LoRa technology. The results are obtained from practical measurements in the campus of UFRJ. An experimental prototype was implemented in different environments, showing that distance variations and interference sources affect the network performance. For example, the experiments show that increasing the spreading factor from SF7 to SF11 reduces the loss rate of transmissions over 2 km distance, however, producing longer communication delay and lower data transfer rate.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Proposta de trabalho	3
1.1.1 Organização da dissertação	4
2 Tecnologias LoRa e LoRaWAN	5
2.1 Camada LoRaWAN	6
2.1.1 Arquitetura do LoRaWAN	6
2.1.2 Classes de Dispositivos do LoRaWAN	8
2.1.3 Formato das Mensagens LoRaWAN	10
2.2 Camada física do LoRa	11
2.3 Parâmetros de Configuração do LoRa PHY	12
2.3.1 Frequência de portadora	12
2.3.2 Taxa de código	13
2.3.3 Fator de espalhamento	13
2.3.4 Formato da carga útil no LoRa	14
3 Trabalhos Relacionados	15
3.1 Análise de desempenho baseada em protótipos	15
3.2 Comparação do LoRa com outras tecnologias	17
3.3 Experimentação com diferentes aplicações	18
4 Metodologia e Cenários de Análise da Rede LoRa	20
4.1 Frequência de operação	20
4.2 Protótipo Experimental Desenvolvido	21
4.3 Cenário dos Experimentos	25
5 Resultados Experimentais	29
5.1 Resultados no Espaço <i>Indoor</i>	29

5.1.1	Medidas no terceiro andar - em LoS	29
5.1.2	Medidas entre Andares - NLoS - 80 metros	32
5.1.3	Medidas entre Andares - NLoS - 160 metros	35
5.2	Resultados <i>Outdoor</i> - Campo Aberto	38
5.2.1	Taxa de Perda de Pacotes	38
5.2.2	Vazão	39
5.2.3	Potência do Sinal	39
5.2.4	Relação Sinal-Ruído	40
5.2.5	Comparação da Vazão Obtida com a Vazão Teórica	41
5.3	Resultados <i>Outdoor</i> - Floresta	41
5.3.1	Taxa de Perda de Pacotes	43
5.3.2	Vazão	43
5.3.3	Potência do Sinal	43
5.3.4	Relação Sinal-Ruído	44
5.4	Discussão dos resultados	45
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	49
	Referências Bibliográficas	52

Lista de Figuras

2.1	Estrutura em camadas da tecnologia LoRaWAN.	5
2.2	Exemplo de topologia de uma rede LoRaWAN.	6
2.3	Arquitetura LoRaWAN (reproduzido de LORA TM -ALLIANCE).	7
2.4	Planejamento dos quadros para os dispositivos classe A do protocolo LoRaWAN.	8
2.5	Planejamento dos quadros para os dispositivos classe B do protocolo LoRaWAN.	9
2.6	Planejamento dos quadros para os dispositivos classe C do protocolo LoRaWAN.	9
2.7	Formato das mensagens do LoRaWAN. O tamanho dos campos está indicado entre colchetes na parte inferior das camadas, em Bytes.	10
2.8	Comportamento do sinal resultante da modulação CSS (reproduzido de Augustin <i>et al.</i> 2016).	11
2.9	Formato das mensagens do LoRa PHY. O tamanho dos campos está indicado entre colchetes na parte inferior das camadas, em Bytes.	14
4.1	Arquitetura do protótipo desenvolvido.	21
4.2	Protótipo experimental da unidade transmissora. Em ordem descendente, o módulo LoRa, o módulo GNSS, e a placa Arduino Uno. O sensor de temperatura aparece ao lado direito dos módulos interconectados. A antena da imagem corresponde à implementada no módulo LoRa, por meio de um conector SMA (<i>SubMiniature version A</i>). A antena aparece desconectada por motivo da imagem.	22
4.3	Protótipo experimental da unidade receptora. Em ordem descendente, o módulo LoRa, a placa Arduino Yún. A antena corresponde à implementada no módulo LoRa, por meio de um conector SMA (<i>SubMiniature version A</i>). A antena aparece desconectada por motivo da imagem.	23
4.4	Protótipos do experimento. (a) Unidade transmissora e unidade receptora. (b) Caixas instaladas em hastes de 2 m de altura.	25

4.5	Cenário e equipamentos do protótipo desenvolvido. (a) Local dos experimentos <i>indoor</i> na UFRJ. (b) Local de teste.	26
4.6	Ilustração do ambiente do cenário <i>indoor</i>	26
4.7	Local dos experimentos <i>outdoor</i> - Campo Aberto (reproduzido do Google Maps).	27
4.8	Local dos experimentos <i>outdoor</i> - Floresta. (a) Local dos experimentos no PARNASO (reproduzido do Google Maps). (b) Exemplo de trilha para o teste.	28
4.9	Características do cenário <i>outdoor</i> - Campo Aberto. (a) mostra a localização com setas da unidade transmissora em diferentes distâncias. ((b), (c), (d), (e), (f)) mostram a localização com setas da unidade receptora à distância.	28
5.1	Tempos de recepção em ambiente <i>indoor</i> com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).	30
5.2	Taxa de perda em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).	31
5.3	Vazão obtida em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).	31
5.4	Potência do sinal em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).	32
5.5	Relação Sinal-Ruído em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).	32
5.6	Tempos de recepção em ambiente <i>indoor</i> em NLoS para a distância de 80 m.	33
5.7	Taxa de perda em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.	34
5.8	Vazão em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.	34
5.9	Potência do sinal em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.	35
5.10	Relação Sinal-Ruído em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.	35
5.11	Tempos de recepção em ambiente <i>indoor</i> em NLoS para a distância de 160 m.	36
5.12	Taxa de perda em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.	36
5.13	Vazão em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.	37

5.14	Potência do sinal em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.	37
5.15	Relação Sinal-Ruído em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.	38
5.16	Taxa de perda em função da distância em ambiente de campo aberto.	39
5.17	Vazão em função da distância em ambiente de campo aberto.	40
5.18	Potência do sinal em função da distância em ambiente de campo aberto.	40
5.19	Relação Sinal-Ruído em função da distância em ambiente de campo aberto.	41
5.20	Comparação da vazão medida com a vazão teórica segundo o fator de espalhamento LoRa.	42
5.21	Taxa de perda em função da distância em ambiente de floresta.	43
5.22	Vazão em função da distância em ambiente de floresta.	44
5.23	Potência do sinal em função da distância em ambiente de floresta.	44
5.24	Relação Sinal-Ruído em função da distância em ambiente de floresta.	45

Lista de Tabelas

2.1	Distribuição de canais para as faixas de frequência ISM EU 868 MHz e US 915 MHz	12
2.2	Valores teóricos de taxa de transmissão em função do SF.	14
4.1	Plano de frequências da tecnologia LoRa para diferentes regiões. O Ciclo de Trabalho* é dependente das regulamentações de cada país; os valores são descritos pelo padrão implementado em cada região . . .	21
4.2	Componentes utilizados na unidade transmissora.	22
4.3	Componentes utilizados na unidade receptora.	23
4.4	Tamanho dos quadros para cada fator de espalhamento.	24
5.1	Relação SF com SNR e RSSI cenário <i>Indoor</i>	47
5.2	Relação SF com SNR e RSSI cenário <i>Outdoor</i> - Campo aberto	48
5.3	Relação SF com SNR e RSSI cenário <i>Outdoor</i> - Floresta	48

Capítulo 1

Introdução

Apoiados no paradigma da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), objetos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação podem realizar tarefas e se comunicar com outros objetos ou dispositivos. Dependendo da aplicação, a comunicação pode ser dispositivo a dispositivo (D2D - *Device-to-Device*), ou pode tornar tais objetos acessíveis através da Internet [1]. Esses objetos são denominados objetos inteligentes. No contexto de Cidades Inteligentes, o paradigma de IoT tem impulsionado a experimentação e análise de infraestruturas urbanas que permitam a inovação em sistemas de mobilidade, energia e saúde, entre outros serviços para a população [2]. A manipulação inteligente de dados nessas infraestruturas pode melhorar a automação de processos, permitir o aprendizado de comportamentos habituais, identificar e tratar eventualidades em qualquer sistema, entre outros. Na área de pesquisa em comunicações, é necessário avaliar tecnologias que permitam estender a densificação dos dispositivos IoT, visando aproveitar vantagens como a baixa potência de consumo dos dispositivos, reuso de frequências, maior cobertura da rede e custo.

Os objetos inteligentes têm como característica a limitação em termos de processamento e energia, tornando a comunicação sem-fio um importante desafio. Nos últimos tempos, muitas tecnologias e padrões de comunicação por radiofrequência têm surgido. Assim, este trabalho está focado nas redes de longo alcance e baixa potência (LPWAN - *Low Power Wide Area Network*), mais especificamente na recentemente proposta tecnologia LoRa (*Long Range*) [3]. O LoRa tem como objetivo atender a esse desafio, sendo um tipo de redes de longo alcance e baixa potência. A tecnologia LoRa implementa um protocolo próprio que define a arquitetura do sistema e o parâmetros de comunicação, conhecido como LoRaWAN [3]. O LoRaWAN é uma especificação para redes LPWAN, e é definida como a camada lógica de rede que faz uso da tecnologia LoRa. O LoRaWAN é um padrão aberto para pesquisa, e é implementado utilizando a camada física LoRa PHY, uma tecnologia de caráter proprietário da Semtech. A disponibilidade de dispositivos LoRa no Brasil é es-

nessa, por conta da falta de regulamentação da tecnologia; vem sendo avaliada uma lei para modificar o procedimento de medição da Densidade Espectral de Potência, o que vai permitir implementar avaliar a modulação LoRa¹. Não existem dispositivos ou implementações comerciais homologadas com a tecnologia, somente testes de experimentação acadêmicos. Outra solução similar também proprietária são as redes SigFox, porém, devido à capacidade de taxa de transmissão, à limitação de mensagens por dia e à largura de banda, comparado com o LoRa [4], encontra-se que o LoRa pode ser mais poli funcional no paradigma das Cidades Inteligentes e da Internet das Coisas.

A técnica de modulação do sinal de rádio utilizada pelo LoRa é o espalhamento espectral [5]. Nesta técnica, cada símbolo é enviado em um sinal de banda estreita propagada sobre uma banda de frequência mais ampla, com a mesma densidade de potência [4, 6]. O sinal resultante é um sinal semelhante ao ruído, porém, resistente à interferência, interferências externas, e de difícil detecção por fontes externas [4, 7]. Uma desvantagem do espalhamento espectral é a subutilização da banda larga; sequências ortogonais resolvem o uso eficiente do espectro [4, 8]. Para isso, na especificação do LoRa, o espalhamento espectral está relacionado a um parâmetro denominado fator de espalhamento (*Spreading Factor* - SF). O LoRa pode ser configurado com seis valores diferentes para o SF (SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12) [3]. Cada valor de SF é ortogonal um do outro, o que permite a transmissão e recepção ao mesmo tempo, isso porque cada sinal LoRa tem uma largura de banda, taxa de dados e tamanhos de *chirp* diferentes [9]. Para cada fator de espalhamento existe um compromisso entre a robustez da modulação a interferências e a taxa de transmissão de bits. Por um lado, o aumento da taxa de transmissão aumenta a vazão da comunicação. Por outro, a perda de robustez a interferências pode induzir a perdas de mensagens, reduzindo a vazão.

Neste trabalho, é realizada uma avaliação da capacidade de comunicação da tecnologia LoRa. Esta análise é realizada em função do parâmetro de espalhamento espectral, dado que esta é uma particularidade da tecnologia: a escolha da modulação é configurável a nível de software. Como parte deste trabalho, são também desenvolvidos protótipos experimentais de nós de comunicação LoRa apoiados em placas de programação Arduino, uma plataforma de desenvolvimento integrado baseada na linguagem C/C++, que tem capacidade de integrar múltiplos circuitos de entrada e saída, entre eles: placas de LoRa para Arduino, módulos de localização GNSS (*Global Navigation Satellite System*) U-Blox, e sensores de umidade e temperatura. A comunicação entre eles é testada para diferentes fatores de espalhamento, a diferentes distâncias de comunicação. A taxa de perda de mensagens e a vazão da comunicação são medidas, a fim de avaliar a eficácia de cada fator de espalhamento,

¹<http://abinc.org.br/anatel-muda-lei-para-aprovacao-de-redes-lorawan/>

para cada distância.

Diferentes soluções têm envolvido o uso da tecnologia LoRa com o objetivo de cobrir grandes áreas geográficas, em diferentes ambientes. Assim, faz-se necessário avaliar características fundamentais da tecnologia, com o objetivo de aproveitar a máxima capacidade e eficiência dos dispositivos que implementam o LoRa. Alguns trabalhos da literatura têm avaliado o comportamento do LoRa em presença de velocidade e efeito Doppler [10], em ambientes *indoor* [11] e *outdoor* [12], geolocalização [13], todos focados em avaliar o desempenho da LoRa em diferentes ambientes. Assim, o presente trabalho complementa a literatura ao realizar uma avaliação do fator de espalhamento, parâmetro de configuração importante da camada física do protocolo, e investigar como a variação desse parâmetro influencia o desempenho da rede, de acordo com as condições de potência e distância entre os nós. Entre outras métricas, verifica-se o impacto da escolha do fator de espalhamento na variação da vazão obtida na rede e da perda de pacotes. Para ilustrar, os resultados obtidos mostram que o aumento no fator de espalhamento de SF7 para SF11 reduz a taxa de perda em transmissões com distâncias de 2 km, porém, tendo maior atraso na comunicação e uma taxa de transferência de dados menor. Além disso, também é avaliada a qualidade do enlace em termos da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR), e potência do sinal recebido, verificando que o enlace está dentro dos parâmetros de operação da tecnologia.

1.1 Proposta de trabalho

O propósito desta dissertação consiste no uso de uma rede LoRa para avaliar a funcionalidade da tecnologia. Para isso, é implementado um protótipo em *hardware* para analisar esta rede. Equipamentos de rede LoRa ainda não estando disponíveis comercialmente no mercado brasileiro, optou-se pela construção de nós LoRa baseados em microcontroladores Arduino e interfaces de rede LoRa, estas encontradas no país. Com os nós LoRa construídos, os objetivos do trabalho foram analisar a vazão, a taxa de perda de pacotes, a potência do sinal e a relação sinal a ruído observada. Estimando essas métricas, é avaliado o comportamento da tecnologia em ambientes *outdoor* e *indoor*. As seguintes etapas foram definidas no desenvolvimento do trabalho:

- descrição da estrutura lógica e física de uma rede LoRa;
- implementação de um protótipo em *hardware* de uma rede LoRa, com capacidade para o processamento de dados;
- análise de métricas de desempenho da rede LoRa, visando a sua implementação como alternativa em redes sem-fio para IoT;

- avaliação do comportamento da tecnologia LoRa em ambientes *indoor* e *outdoor*.

1.1.1 Organização da dissertação

O restante da dissertação está organizado da seguinte forma. A Capítulo 2 fornece a fundamentação teórica sobre a tecnologia LoRa, apresentando brevemente a camada física (LoRa PHY) e o protocolo que define a arquitetura de comunicação e de acesso ao meio do LoRa, o LoRaWAN. A Capítulo 3 discute os trabalhos relacionados. Já a Capítulo 4 apresenta a metodologia de medidas utilizada neste trabalho, assim como o protótipo de *hardware*, baseado no Arduino, implementado para os experimentos. A Capítulo 5 apresenta os experimentos e resultados obtidos. Por fim, a Capítulo 6 conclui o trabalho e apresenta desafios futuros.

Capítulo 2

Tecnologias LoRa e LoRaWAN

LoRa (*Long Range*) [3] é uma especificação proprietária para redes de grande alcance e de baixa potência, focada em “coisas” (*things*), isto é, dispositivos presentes no cotidiano dos usuários e que seguem o paradigma IoT. Enquadrado na categoria de redes LPWAN (*low power wide area networks*), o LoRa procura atender aos requisitos de baixo consumo de energia dos objetos inteligentes. Além disso, o LoRa opera em frequências não licenciadas ISM, com o intuito de reaproveitar a operação em frequência em redes de telefonia legadas (GPRS, GSM, entre outras) [14].

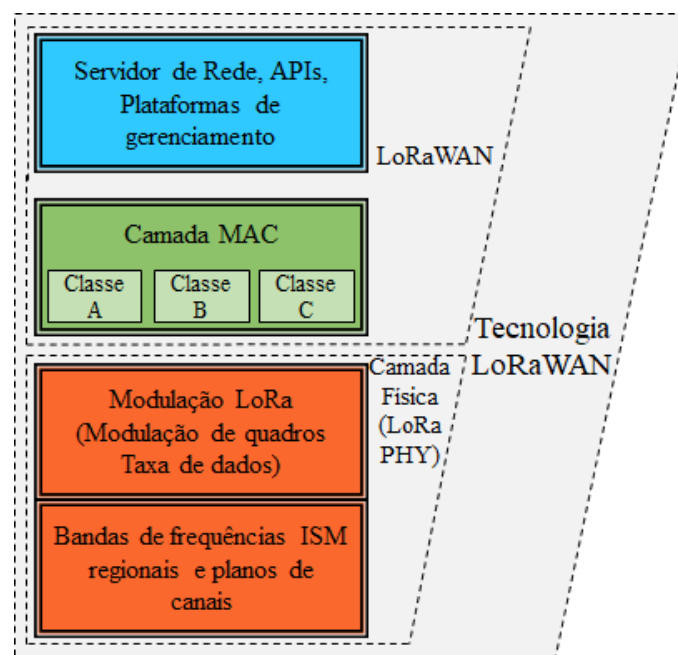


Figura 2.1: Estrutura em camadas da tecnologia LoRaWAN.

Baseado em um modelo de camadas de funções, como se mostra na Figura 2.1, a tecnologia LoRaWAN implementa uma pilha de protocolos que define a comunicação entre os componentes da arquitetura da tecnologia em um único salto. Na prática, a tecnologia LoRa é simplesmente a estrutura física/eletrônica que permite a modulação. Para criar uma rede, a camada de controle de acesso ao meio é necessária.

A camada lógica da rede (camada MAC, Servidor de Rede e Servidor de Aplicação), recebe o nome de LoRaWAN. A associação da camada física LoRa com a camada lógica da rede LoRaWAN constituem a rede LoRaWAN. Desse modo, dispositivos terminais conectam-se na rede, sendo estabelecidos os parâmetros de frequência e taxas de transmissão através da camada lógica da rede.

2.1 Camada LoRaWAN

O LoRaWAN é o protocolo que define a arquitetura do sistema e parâmetros de comunicação e de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*) que utiliza a camada física LoRa. O LoRaWAN define taxas de transmissão de dados, o suporte à comunicação bidirecional e a oferta de serviços de mobilidade e localização dos nós da rede. Diferente do LoRa PHY, a especificação do protocolo LoRaWAN é mantida aberta e divulgada ao público desde 2015 [15].

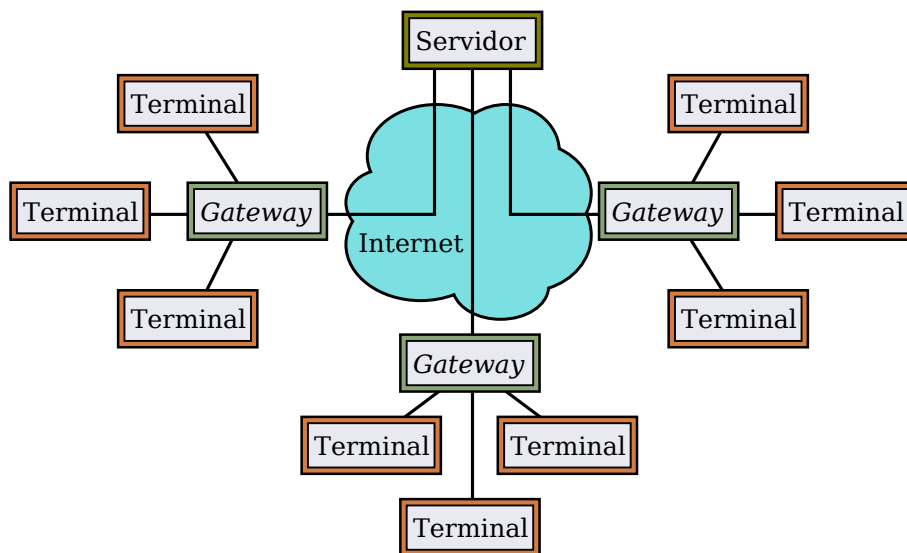


Figura 2.2: Exemplo de topologia de uma rede LoRaWAN.

2.1.1 Arquitetura do LoRaWAN

A rede LoRaWAN é composta por três tipos de dispositivos: terminais, *gateways* e servidores. Os dispositivos terminais são objetos inteligentes, porém, tipicamente, com restrições energéticas. Podem ser sensores, atuadores ou outros tipos de dispositivos inteligentes. Os *gateways* são dispositivos com restrições mais leves em termos de energia e processamento, que servem de ligação entre o LoRaWAN e outras redes. Os servidores são dispositivos que recebem e analisam as informações enviadas pelos dispositivos terminais ou que comandam os dispositivos terminais [4, 16, 17]. Ademais, o LoRaWAN possui uma topologia em estrela de estrelas [18]. A Figura 2.2

mostra a topologia geral do LoRaWAN. A comunicação na tecnologia LoRa se dá entre os dispositivos terminais e os *gateways*.

A Figura 2.3 mostra a arquitetura da tecnologia LoRaWAN (reproduzido de [3]). Especificamente, um *gateway* LoRa gerencia a rede de dispositivos terminais, atribuindo sub-bandas de frequência e fatores de espalhamento para os dispositivos terminais que está gerenciando, permitindo assim a ortogonalidade da rede, e encaminha para o servidor de rede todos os dados recebidos dos dispositivos terminais, fazendo as vezes de ponte entre os dispositivos terminais e o servidor de rede. Para tanto, envia mensagens de configuração aos dispositivos terminais, fazendo com que a comunicação bidirecional possa ser estabelecida. Por outro lado, também gerencia a criptografia dos dados entre a camada de aplicação e a camada MAC, além de se comunicar com os servidores de rede e aplicação baseado em pilhas de protocolos IP [3].

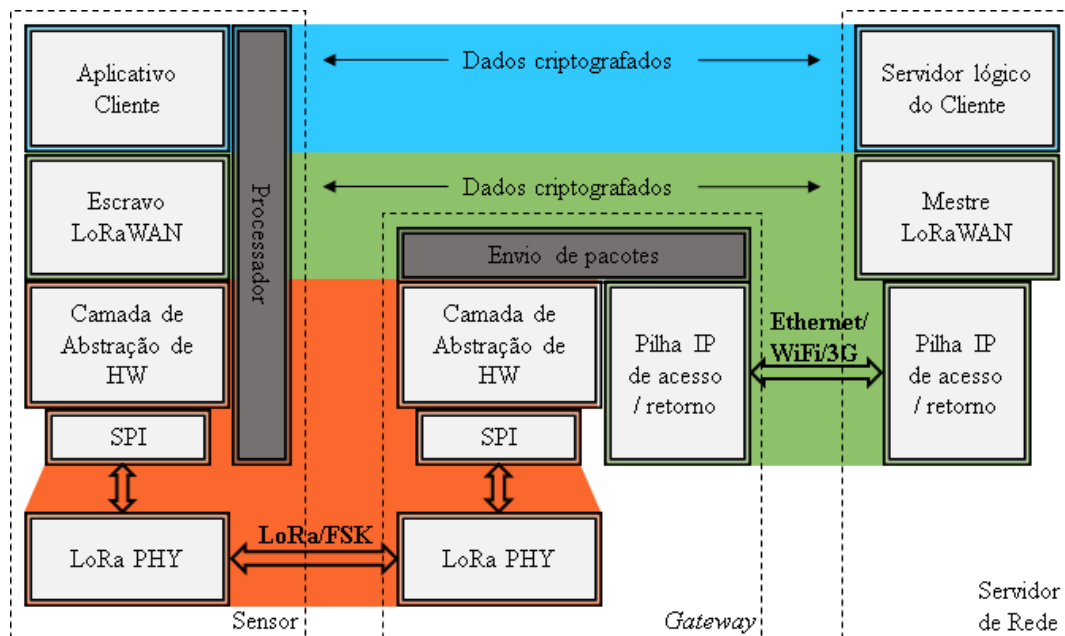


Figura 2.3: Arquitetura LoRaWAN (reproduzido de LORATM-ALLIANCE).

O servidor de rede gerencia a duplicação de pacotes e a taxa adaptativa de dados, para a maximização da capacidade da rede (mudando o fator de espalhamento), segundo o nível da relação sinal a ruído, visando propiciar a ortogonalidade nos dispositivos terminais, tudo isso através do *gateway*, ou diretamente. O servidor de aplicação se encarrega da distribuição e recepção de dados, e dependendo desses dados, toma ações específicas. O servidor de aplicação recebe os dados do servidor de rede e faz o direcionamento desses dados segundo o tipo de informação. Dependendo do tipo de rede, o servidor de rede e aplicação podem coexistir no mesmo dispositivo físico. Tanto o sensor, quanto o *gateway* se comunicam com a tecnologia LoRa a partir do protocolo de interface serial (*Serial Peripheral Interface* - SPI),

permitindo comunicação síncrona entre a camada física e a camada lógica, e essa troca de informações entre o físico/lógico é levada a cabo pela camada de abstração de hardware (*Hardware Abstraction Layer* - HAL), que interpreta instruções de *software* para o *hardware* e vice-versa. O protocolo que permite o enlace de dados na camada MAC é o ALOHA simples [4, 8].

2.1.2 Classes de Dispositivos do LoRaWAN

A especificação das redes LoRaWAN define três classes de dispositivos terminais em sua arquitetura para atingir diferentes tipos de serviço: classe A, classe B e classe C [15]. A especificação do LoRaWAN usa três quadros específicos para exemplificar as classes de dispositivos finais:

- **Quadro de transmissão:** O quadro de transmissão contém as informações de *uplink* ou *downlink* entre o dispositivo final e o servidor, para o caso, o *gateway*. O formato do quadro pode variar segundo seja *uplink* ou *downlink* [15];
- **Quadro de recepção:** O quadro de recepção contém as informações de *downlink* do servidor de rede para o dispositivo terminal, podendo ser retransmitido pelo gateway. Para todas as classes de dispositivos existem dois quadros de recepção. Esses quadros de recepção podem ter mensagens de configuração da camada física [15];
- **Beacon:** Os *beacons* são usados pelos dispositivos classe B para sincronizar participantes da rede com um conjunto de serviços;
- **Tempo de atraso:** Tempos estabelecidos para a recepção ou envio dos quadros de recepção depois de um quadro de transmissão.

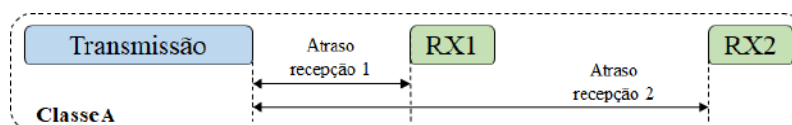


Figura 2.4: Planejamento dos quadros para os dispositivos classe A do protocolo LoRaWAN.

Nos dispositivos classe A, o dispositivo terminal pode enviar mensagens para o nó gateway a qualquer momento. Entretanto, o dispositivo terminal só fica disponível para recepção durante intervalos de tempo para enviar quadros denominados "quadros de recepção". Por meio desses quadros, o *gateway* pode enviar mensagens para o dispositivo terminal. Um dispositivo classe A inicia a comunicação com o *gateway* e, após a transmissão, inicia um quadro de recepção, aguarda um determinado intervalo de tempo e inicia um segundo quadro de recepção. Um novo quadro

de recepção apenas será aberto após uma nova transmissão do mesmo dispositivo classe A [15]. A Figura 2.4 mostra a distribuição dos quadros para os dispositivos classe A. Esse modo de operação deve ser implementado por todos os dispositivos LoRa.

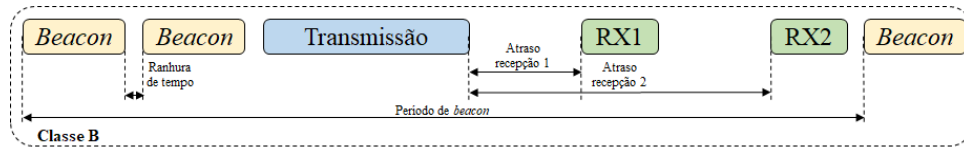


Figura 2.5: Planejamento dos quadros para os dispositivos classe B do protocolo LoRaWAN.

Nos dispositivos classe B, o processo é semelhante ao da classe A. O dispositivo classe B também abre dois quadros de recepção após realizar uma transmissão. Porém, adicionalmente, os dispositivos classe B abrem quadros de recepção com tempos agendados ou de referência, configurados através de mensagens de *beacon* emitidas pelo *gateway*. Os *beacons* também são responsáveis pelo sincronismo entre os dispositivos terminais e os dispositivos *gateway*. A Figura 2.5 mostra a distribuição dos quadros para os dispositivos classe B. Os dispositivos classe B têm a capacidade de fazer trocas de mensagens *Unicast* e *Multicast*. Assim, um dispositivo final envia uma única mensagem *unicast* para um *gateway*, enquanto um *gateway* pode enviar múltiplas mensagens *multicast* para múltiplos dispositivos finais [15]

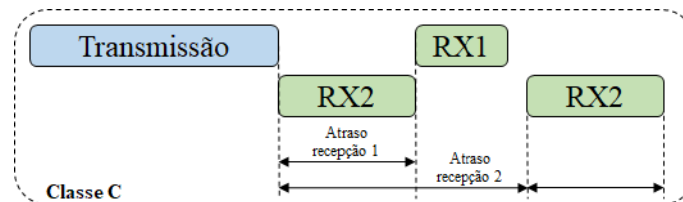


Figura 2.6: Planejamento dos quadros para os dispositivos classe C do protocolo LoRaWAN.

Nos dispositivos classe C, os dispositivos terminais estão sempre disponíveis para a recepção de mensagens. Na classe C os dispositivos são usados para conexões com fontes de energia externas, e por isso não precisam reduzir os tempos de recepção ou transmissão. O dispositivo classe C dá prioridade à escuta dos parâmetros do RX2, abrindo um quadro de recepção RX2 mais curto entre o final da transmissão e o começo do RX1. Assim que o quadro do RX1 for fechado, o quadro de recepção RX2 ficará aberto até o dispositivo final ter outra transmissão [15]. A Figura 2.6 mostra a distribuição dos quadros de recepção para os dispositivos classe C.

Uma vez que é necessário consumir energia para transmitir, mas também para receber mensagens, as classes de operação se diferenciam não só pelo caráter da bidirecionalidade da comunicação, mas também pelo consumo de energia. A operação

em modo classe A, por exemplo, pode servir a dispositivos que sejam sensores e cujo tráfego de dados seja majoritariamente a entrega de dados coletados ao *gateway*, com o menor custo de energia. Já um exemplo de aplicação para a operação em classe B é para dispositivos que sejam sensores e atuadores que, a intervalos regulares, recebam ordens de atuação, com um custo energético intermediário. O modo de operação em classe C, por outro lado, serve para sensores e atuadores que possam receber ordens de atuação a qualquer momento, a um custo maior de energia.

2.1.3 Formato das Mensagens LoRaWAN

O formato das mensagens LoRaWAN é mostrado na Figura 2.7. No cabeçalho do quadro, o *DevAddr* indica o endereço do dispositivo terminal, *FCtrl*, *FCnt*, e *FOpts* são campos de controle de quadro, contador de quadros, e opções do quadro para o comando MAC. Já na Carga útil do MAC, aparecem o *Fport*, que contém todas as informações do quadro, e o *FRMPayload* que contém informações relativas a criptografia para calcular e verificar a integridade das mensagens, e a carga útil das mensagens [19]. Depois, na carga útil da camada física PHY estão o *MHDR*, que contém o cabeçalho da camada MAC, o *MACPayload* que concentra todas as informações da carga útil do MAC, e o *MIC*, que é um código de integridade da mensagem, que concentra o *MHDR*, e o *MACPayload*. O protocolo LoRaWAN adiciona pelo menos 13 bytes no cabeçalho. Também é definido um ciclo de trabalho (*duty cycle*) para os dispositivos, que é específico para cada região, uma vez que os órgãos de regulação de cada país possuem regras específicas. Nesta dissertação, não se avalia o ciclo de trabalho e a relação entre o ciclo de trabalho e o desempenho de uma rede LoRaWAN.

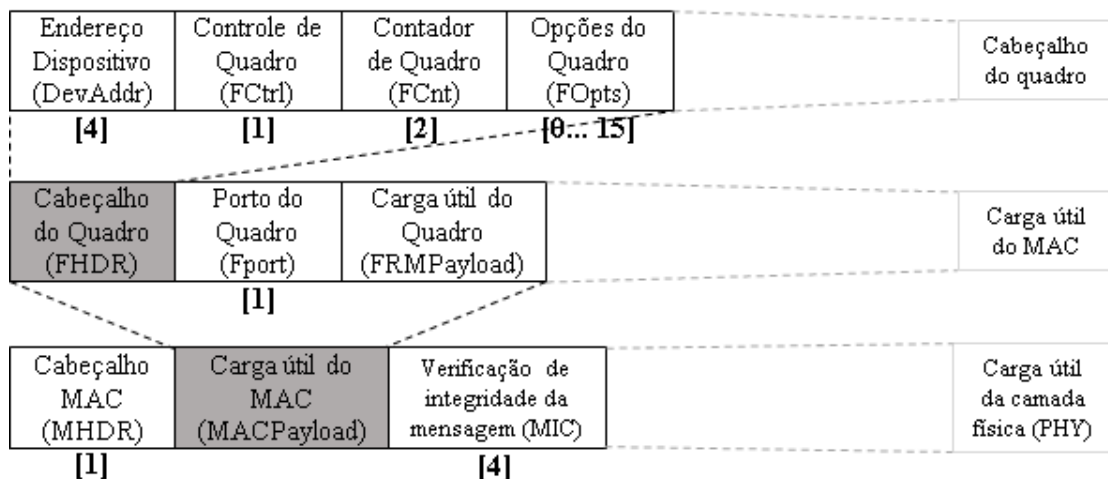


Figura 2.7: Formato das mensagens do LoRaWAN. O tamanho dos campos está indicado entre colchetes na parte inferior das camadas, em Bytes.

2.2 Camada física do LoRa

A camada física do LoRa (LoRa PHY) é uma tecnologia proprietária da empresa Semtech [5, 19], baseada em uma técnica de modulação de espalhamento espectral proprietária, uma variante do espalhamento espectral por *chirp* (*Chirp Spread Spectrum* – CSS). Nesta técnica, cada símbolo é enviado em um sinal de banda estreita propagada sobre uma banda de frequência mais ampla, com a mesma densidade de potência [4, 6, 15]. A Figura 2.8 (reproduzido de [19]), mostra o comportamento do sinal resultante da técnica de modulação usada na tecnologia LoRa. Além da Correção Adiantada de Erros (*Forward Error Correction* - FEC), e do CSS, o LoRa consegue incrementar a sensibilidade do receptor, aumentar a faixa de cobertura, prover alta robustez, resistência ao efeito de múltiplas rotas, ao efeito Doppler, além de permitir o uso de baixa potência para a transmissão [17].

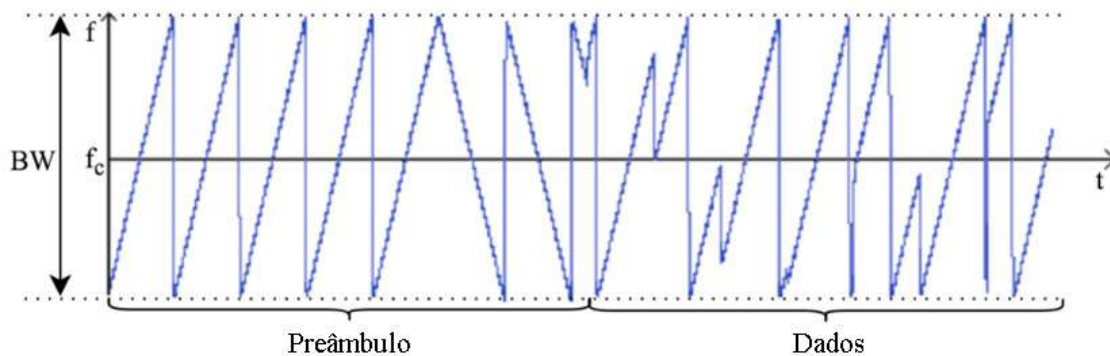


Figura 2.8: Comportamento do sinal resultante da modulação CSS (reproduzido de Augustin *et al.* 2016).

O LoRa substitui um bit por múltiplos *chips* de informação, fazendo com que o SF tenha influência na duração em tempo no ar de um pacote [15]. Os múltiplos *chips* de informação precisam ser transmitidos tão rápido quanto a taxa de bits original. Portanto, os dados são enviados com uma taxa de *chip* (*chips per second* - cps) igual à largura de banda ($125 \text{ kHz} = 125 \text{ kcps}$). Se a largura de banda for baixa, a sensibilidade será alta, mas a taxa de transmissão será baixa; quer dizer que a potência do sinal que o receptor vai detectar pode estar por baixo do nível de ruído, requerendo um maior ganho de processamento na recepção para a decodificação do sinal [4]. Por outro lado, uma largura de banda alta leva a uma alta taxa de transferência, mas com maior tempo de transmissão e menor sensibilidade. Com o largura de banda maior, mais sinais ortogonais serão usados, resultando em uma capacidade da rede mais alta, mas a potência do sinal terá uma sensibilidade mais baixa por conta da integração adicional de ruído [20]. Para a tecnologia LoRa são definidas três larguras de banda; a saber: 125 kHz, 250 kHz, e 500 kHz.

2.3 Parâmetros de Configuração do LoRa PHY

Para que os dispositivos terminais se comuniquem com os *gateways*, a tecnologia LoRa se baseia na adaptação da modulação CSS [16]. O consumo de energia, a faixa de transmissão e a resistência à interferência do ruído podem ser determinados a partir de quatro parâmetros de configuração da camada física do LoRa: a frequência da portadora, que define a frequência central para a banda de transmissão; a largura de banda, que define o tamanho da faixa de frequências utilizada; a taxa de código (*Code Rate* – CR), que define a taxa de FEC e o fator de espalhamento (*Spreading Factor* – SF), que define o espalhamento espectral [17, 21].

2.3.1 Frequência de portadora

A Tabela 2.1 especifica a distribuição de bandas, sub-bandas, canais, divisão de sub-bandas e canal de *uplink* e *downlink* para as faixas de frequências mais estudadas na literatura: ISM EU 868 MHz e US 915 MHz. Para o plano de frequências ISM do Brasil, especificamente a faixa de 902-928 MHz, observa-se que tem canais dedicados para o canal de Tx e o canal de Rx, a diferença da distribuição de frequências EU, que tem canais bidirecionais. Sendo que a frequência da portadora é definida de acordo a região de operação dos equipamentos, esse parâmetro não é, em geral, ajustável de acordo com aplicações. A largura de banda, por sua vez, possui três larguras programáveis: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz nas especificações gerais do LoRa. A largura de banda com maior capacidade de transmissão de dados é a de 500 kHz. Assim sendo, este trabalho considera apenas a largura de banda de 500 kHz.

Tabela 2.1: Distribuição de canais para as faixas de frequência ISM EU 868 MHz e US 915 MHz

Região	Faixa Freq. (MHz)	Canais	Sub-banda (MHz)	Divisão Sub-banda (kHz)	Canal Tx (kHz)	Canal Rx (kHz)
US	867-870	10	867,1-868,8 (SF7-SF12)	200	125	125
			868,3	—	250	250
			868,8 (FSK) (50 kbit/s)	—	—	—
			869,525 (SF9, RX2)	—	—	125
EU	902-928	64	902,3-914,9	200	125	—
		8	903,0-914,2 (SF7-SF12)	1600	125	—
			904,6 (SF8)	—	500	—
		8	923,3-927,5 (SF7-SF12)	600	—	500

2.3.2 Taxa de código

A taxa de código (CR) é relacionada com a técnica de FEC. A CR define quantos bits são utilizados para dados de redundância na mensagem, a fim de realizar a recuperação de erros. São definidos quatro valores de CR para serem implementados, a saber: $4/5$, $4/6$, $4/7$, e $4/8$. Um CR maior oferece maior proteção, porém, incrementa o tempo ao ar (*time on air*) [20]. A CR define a taxa de codificação T_c [5] como:

$$T_c = \frac{4}{4 + CR}, \quad \text{com } CR \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (2.1)$$

2.3.3 Fator de espalhamento

A especificação LoRa define seis valores diferentes para o parâmetro de fator de espalhamento: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12 [5]. Devido ao uso da técnica de espalhamento pelo LoRa, grandes sequências de bits são codificadas em um único símbolo, reduzindo assim a relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) e interferência de outras frequências nas transmissões de dados [7]. Enquanto o SF seja maior, aumenta-se a SNR, a sensibilidade e o alcance; quer dizer, o aumento da energia por bit torna maior o alcance entre transmissor e receptor, dependendo diretamente da potência de transmissão e da taxa de modulação. A potência de transmissão é limitada pelas normas de regulação para bandas das frequências não licenciadas, enquanto a taxa de modulação é definida pelo SF. Também é definida uma taxa de transmissão R_b teórica, definida em função do fator de espalhamento como:

$$R_b = SF \times \frac{T_c \times BW}{2^{SF}}, \quad \text{com } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\}. \quad (2.2)$$

O tempo requerido para enviar um símbolo LoRa, então, está influenciado pelo tipo de modulação, e o fator de espalhamento, em função da largura de banda do canal, a dizer:

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad \text{com } BW \in \{125 \text{ kHz}, 250 \text{ kHz}, 500 \text{ kHz}\}. \quad (2.3)$$

A Tabela 2.2 exhibe os valores teóricos de taxa de transmissão para diferentes fatores de espalhamento, para uma CR igual a $4/5$ (a menor redundância no FEC) e uma largura de banda de 500 kHz (a maior largura). Esses valores teóricos são utilizados como referência para a análise de desempenho contida neste trabalho. O Capítulo 5 compara esses valores com os valores obtidos experimentalmente, a fim de estabelecer bases para as aplicações que utilizam LoRa e LoRaWAN como tecnologias de comunicação.

Tabela 2.2: Valores teóricos de taxa de transmissão em função do SF.

Fator de espalhamento	Taxa de transmissão teórica (bits/s)
SF7	21875
SF8	12500
SF9	7031
SF10	3906
SF11	2148
SF12	1172

2.3.4 Formato da carga útil no LoRa

O formato das mensagens no LoRa é uma especificação implementada pela Semtech [5], para todos os dispositivos que fazem parte da rede. Na Figura 2.9 é mostrado o formato de um quadro LoRa PHY. O preâmbulo indica o esquema de modulação dos pacotes, estabelecendo um mesmo fator de espalhamento para cada pacote enviado. Os cabeçalhos *PHY* e *PHY_CRC* indicam a taxa de código para executar a FEC a ser implementada na mensagem. A carga útil PHY será então a concatenação das informações contidas na camada MAC, e no cabeçalho do quadro, completando assim o formato da carga útil na camada física PHY.

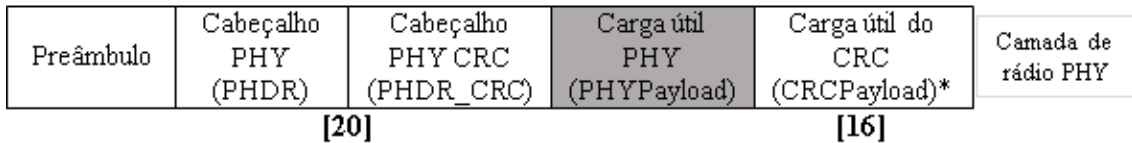


Figura 2.9: Formato das mensagens do LoRa PHY. O tamanho dos campos está indicado entre colchetes na parte inferior das camadas, em Bytes.

Tendo descrito o protocolo LoRaWAN e a tecnologia LoRa, no seguinte capítulo será feita uma revisão bibliográfica, para mostrar os trabalhos que têm sido adiantados pela comunidade científica para a implementação de redes LPWAN no paradigma das Cidades Inteligentes e a Internet das Coisas, analisando, comparando e experimentando com as redes LoRaWAN.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo, são apresentados os principais trabalhos relacionados encontrados na literatura. Os artigos encontrados na literatura podem ser divididos em três grupos principais: trabalhos que, como a presente dissertação, analisam o desempenho da rede LoRa através de protótipos experimentais; trabalhos que comparam o LoRa com outras redes sem-fio; e trabalhos que analisam o LoRa em cenários de aplicação específicos.

3.1 Análise de desempenho baseada em protótipos

Petäjällä *et al.* em [12] avaliam uma tecnologia de baixo consumo de energia e longo alcance, implementando a tecnologia LoRa. Para isso, os autores fizeram experimentos práticos para avaliar a cobertura em diferentes ambientes: (i) Um ambiente aquático, no qual instalaram um dispositivo terminal transmitindo desde um barco no mar; (ii) Um ambiente terrestre, na cidade de Oulu, Finlândia. Com esse intuito, foram avaliadas a taxa de perda de pacotes e a intensidade da potência do sinal recebido para os intervalos de distância avaliados. Foi concluído que a taxa de perda foi aumentando conforme aumentou a distância de transmissão, observou-se, no entanto, que o desvanecimento do sinal medido foi maior que o desvanecimento obtido do modelo de perda no espaço livre.

Petäjällä *et al.* [10] realizam uma análise teórica e experimental do LoRa em redes LPWAN. Baseados no anterior artigo, são avaliadas métricas de desempenho utilizando um dispositivo final móvel para se observar a influência do efeito Doppler, caracterizar a taxa de entrega do LoRaWAN baseado em um modelo teórico e, por fim, realizar uma avaliação de métricas de desempenho em experimentos práticos. Os autores consideram o modelo de efeito Doppler definido como a variação da frequência de uma fonte deslocando-se, e emitindo com respeito a um

receptor estático. Em razão da técnica de modulação do LoRa, o espalhamento espectral por *chirp*, se a taxa de *chirp* é alta, isto faz com que as mudanças de tempo geradas pelas variações de frequência do efeito Doppler não sejam significativas, fazendo com que o desempenho do LoRa pouco se deteriore em presença do efeito Doppler. Porém, uma taxa de *chirp* baixa produzirá uma mudança de tempo significativa e, portanto, uma taxa de recepção baixa. Em uma segunda fase, é caracterizada a taxa de entrega de um dispositivo terminal (ED - *End Device*) para um *gateway*. Para tanto, é avaliado o tempo de um quadro LoRaWAN para a técnica de modulação LoRa e a modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). Partindo dessa avaliação, o tamanho da carga útil máxima dependerá do modo de transmissão configurado no ED. Também é avaliada a taxa de entrega em presença das regulamentações de frequência para bandas não licenciadas ISM. Por último, Petäjäljärvi *et al.* avaliam a escalabilidade e a capacidade da rede. Para isso, foram feitos experimentos práticos em três cenários: (i) um cenário com um ED se deslocando em um eixo horizontal para gerar variações de velocidade angular, (ii) um ED em um veículo comunicando-se com um receptor estático, e (iii) um ED em um ambiente veicular e um ED em um ambiente de transporte aquático para medir o alcance. No presente trabalho, busca-se relacionar o fator de espalhamento com as mudanças de potência, focando-se no posicionamento estático, e na mobilidade constante da unidade transmissora.

Já Mikhaylov *et al.* [22], baseados nos resultados de [12, 23], fazem uma análise do desempenho do LoRaWAN avaliando o rendimento máximo, capacidade e alcance. Os autores concluíram que o LoRaWAN teoricamente pode ter milhões de nós conectados enviando poucos bits, mas que só uma pequena porção desses dispositivos podem se localizar longe do *gateway*, por conta das interferências que podem afetar os enlaces (estruturas, outros sinais). Também concluíram que devido à limitação de ciclo de trabalho, o LoRaWAN pode reduzir a latência e o consumo de energia, porém, é altamente sensível a colisões de pacotes por conta do método de acesso ao meio (ALOHA).

Outro trabalho com implementação de protótipo prático para avaliar a tecnologia LoRa foi realizado por Baharudin *et al.* [13]. Os autores implementam um protótipo com Dragino LoRa nos dispositivos terminais, e um *dock* (semelhante a um *gateway*), porém, sem as restrições de ciclo de trabalho. A potência do sinal recebido (*Received Signal Strength Indication* – RSSI) dos dispositivos terminais é avaliada de acordo com a variação da distância para o *dock*. Os autores demonstram o quanto a coexistência de múltiplos sensores degrada a qualidade do sinal de recepção, devido à interferência de redes de sensores vizinhas. No entanto, os resultados do RSSI do sinal da rede de sensores permitiram concluir que, devido à sensibilidade de recepção do LoRa, esta é uma tecnologia sem-fio apropriada para

grandes distâncias. O presente trabalho identifica a posição dos autores sobre o RSSI e a relação direta com a distância que o LoRa pode atingir, mas avalia as implicações do fator de espalhamento no desempenho do enlace em relação a capacidade máxima, vazão e qualidade do sinal.

Wixted *et al.* [24] fazem uma avaliação do LoRa e LoRaWAN para redes de sensores sem-fio. Os autores descrevem a tecnologia brevemente, e implementaram um experimento prático na cidade de Glasgow, visando dois ambientes: (i) uma comunicação sem-fio LoRa, e (ii) um ambiente avaliando o LoRaWAN. Para o ambiente LoRa sem-fio implementaram um receptor controlado com um microcontrolador Arduino e um módulo LoRa, enquanto para o transmissor implementaram uma Raspberry Pi para o processamento, um módulo 3G, GPS, e um módulo LoRa. Neste ambiente, obtiveram transmissões de aproximadamente 2,2 km, afirmando que direção das ruas, edificações e pedestres podem interferir na comunicação. Para o ambiente LoRaWAN, implementaram dois *gateways* para a recepção de dados, e um transmissor implementando uma Raspberry Pi para o processamento, um módulo 3G, GPS, e um módulo LoRa. Neste ambiente, obtiveram aproximadamente 42% de transmissões bem sucedidas quando foi feita uma comunicação entre *gateway* e nó móvel com ACK recebido, em uma distância de aproximadamente 1,9 km.

3.2 Comparação do LoRa com outras tecnologias

Outros trabalhos relacionaram outras tecnologias LPWAN e sem-fio com o intuito de avaliar o desempenho do LoRa. Assim, Margelis *et al.* [25] fazem uma comparação de tecnologias sem-fio para redes LPWAN Sigfox, OnRamp e LoRaWAN. Os autores avaliam a taxa de erro de bit para o OnRamp, e fazem uma introdução para as outras duas tecnologias. Já Ray [26] faz uma revisão de tecnologias LPWAN de baixo rendimento para aplicações industriais. Para isso, Ray compara diferentes plataformas de *hardware* que podem suportar aplicações para IoT, uma comparação de tecnologias para redes sem-fio, plataformas de gerenciamento e diferentes casos de uso aonde podem ser implementadas soluções IoT. Já Reynders *et al.* em [6] avaliam diferenças técnicas entre duas tecnologias sem-fio para redes LPWAN: o LoRa e o Sigfox. Diferenciadas pelo tipo de modulação que usam, ou seja, LoRa, espalhamento espectral por *chirp* (CSS - *Chirp Spreading Spectrum*, Sigfox, banda ultra estreita (UNB - *Ultra Narrow Band*), os autores comparam o desempenho da camada física avaliando o alcance e a coexistência para as duas tecnologias. Já para avaliar a camada de controle de acesso ao meio, os autores comparam o desempenho baseado em interferência e coexistência com respeito ao controle de acesso ao meio. Para isso, Reynders *et al.* desenvolveram ambientes de simulação sob a plataforma MATLAB e NS-3 respectivamente. Para avaliar a interferência, foi desenhado um

cenário com uma área de 1000 m \times 1000 m com um nó central. Foram simulados cenários avaliando a interferência entre duas redes com modulação CSS, e um outro entre UNB e CSS. Os autores concluem que o UNB tem melhor desempenho que o CSS para grandes quantidades de nós em um intervalo de distância amplo, porém, o CSS oferece maior desempenho quanto ao rendimento em quanto à vazão, e a variação do fator de espalhamento vai permitir atingir maiores distâncias.

Centenaro *et al.* [7] fazem uma comparação de diferentes tecnologias de redes de baixa potência e longo alcance (*Low Power Wide Area Network* – LPWAN) e é realizada uma descrição específica da tecnologia LoRa. São executados dois experimentos: primeiramente, é implementada uma rede privada LoRa para controlar as variáveis de temperatura e umidade de um edifício de 19 andares. A seguir, é realizada uma análise de cobertura e alcance. Para isso, Centenaro *et al.* implementam uma rede LoRa em Padova, Itália, com uma área de 100 km². Baseado no alcance teórico de um nó (em torno de 2 km), foi assumida uma cobertura nominal de 1,2 km. Conclui-se que com 30 *gateways* seria possível cobrir até 7.000 habitantes por *gateway*.

Já Adelantado *et al.* [27] apresentam uma publicação na qual se avaliam os limites do LoRaWAN, com o objetivo de mostrar as limitações da tecnologia. Para isso, os autores discutem as capacidades e limitações da tecnologia no contexto de casos de uso. Baseado nas limitações do ciclo de trabalho (*duty cycle*), tempos de transmissão, tamanho do cabeçalho MAC e número de pacotes recebidos por hora, Adelantado *et al.* mostra que o número de pacotes recebidos por hora diminui conforme aumentam o número de nós, independentemente do tamanho do cabeçalho MAC ou da vazão dos dados úteis (*goodput*). Assim, os autores descrevem as aplicações que podem ser consideradas para a implementação de uma rede LoRa. Entre os desafios descritos pelos autores, destacam-se métodos de saltos entre *gateways* e nós, implementação de acesso múltiplo por divisão de tempo (*Time Division Multiple Access* - TDMA) e redução de potência usada na rede LoRaWAN implementando múltiplos saltos.

3.3 Experimentação com diferentes aplicações

Outros trabalhos apresentam experimentos com a tecnologia LoRa em diferentes áreas de aplicação. Latré *et al.* [28] implementam um *testbed* integrando tecnologias sem-fio (incluindo o LoRa) para o gerenciamento de IoT em cidades inteligentes. Toldov *et al.* [29] utilizam a tecnologia LoRa para o rastreamento de animais selvagens. Já Kim *et al.* em [30] avaliam o desempenho do LoRa com respeito à distância, comparando a tecnologia com o IEEE 802.11, obtendo maior sensibilidade em recepção, porém mais baixa taxa de dados, como esperado. Pétric *et al.* [31] implementam uma pilha de protocolos de rede com o objetivo de permitir

o acesso às redes LPWAN, abstraindo a complexidade da rede usando protocolos da camada de aplicação para acesso à internet para dispositivos limitados (CoAP). Por outro lado, Neumann *et al.* [11] implementam uma rede protótipo LoRaWAN com um *gateway*, um dispositivo terminal, e um servidor de rede LoRaWAN, para avaliar o desempenho em uma edificação. O nó é deslocado por diferentes pontos e diferentes andares dentro da edificação. São avaliados o tempo de transmissão, a sensibilidade de recepção, a relação sinal-ruído, a perda de pacotes, o consumo energético e o atraso de transmissão.

O presente trabalho faz uma avaliação da tecnologia LoRa, analisando as métricas de desempenho de taxa de perda, a SNR, a potência do sinal e a vazão da rede em função dos diferentes fatores de espalhamento e a diferentes distâncias entre os nós. Tais experimentos têm o intuito de compreender como as variações de distância estabelecem condições diferentes para o comportamento de uma rede LoRaWAN. Além disso, preenchem uma lacuna da literatura, pois avaliam o desempenho do LoRa em função de diferentes configurações de modulação na camada física. No seguinte capítulo, é introduzida a metodologia para a implementação da tecnologia LoRa apoiado na plataforma de *hardware* Arduino, que está baseada em microcontroladores suportados para IoT. Da mesma forma, são mostrados os cenários experimentais para a execução dos testes.

Capítulo 4

Metodologia e Cenários de Análise da Rede LoRa

Os experimentos realizados para a avaliação da tecnologia LoRa consistem de medições práticas de taxa de perda, potência do sinal e relação sinal-ruído (SNR), em função de diferentes configurações do fator de espalhamento utilizado na modulação. O objetivo é estabelecer parâmetros de funcionamento dos dispositivos usados e verificar a viabilidade de implementação para diferentes cenários da Internet das Coisas.

Para a realização dos experimentos, foram montados dois protótipos de nós terminais LoRa, baseados em microcontroladores Arduino. Assim, este capítulo descreve além dos cenários de avaliação e experimentação, o projeto do hardware dos nós terminais LoRa.

4.1 Frequência de operação

Sendo uma tecnologia de baixa potência e longo alcance, o LoRa foi projetado para aplicações de radiofrequência orientadas a aplicações específicas. Além disso, o LoRa faz uso de frequências não licenciadas do espectro. Essas frequências não licenciadas não são mais do que o reuso de frequências de telecomunicações móveis, para evitar a sobrecarga de tecnologias e simplificar a utilização de frequências de operação. No entanto, o uso destas frequências está condicionado a restrições de radiação, capacidade e ciclo de trabalho.

Baseado no Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil disponibilizado pela Anatel [32], as radiofrequências disponíveis para o desenvolvimento industrial, científico e médico (*Industrial, Scientific, Medical* - ISM) está nas faixas de frequência de 902 MHz-928 MHz, 2.4 GHz-2.5 GHz, e 5,725 GHz-5,875 GHz, frequências disponíveis para experimentação. Já a tecnologia LoRa

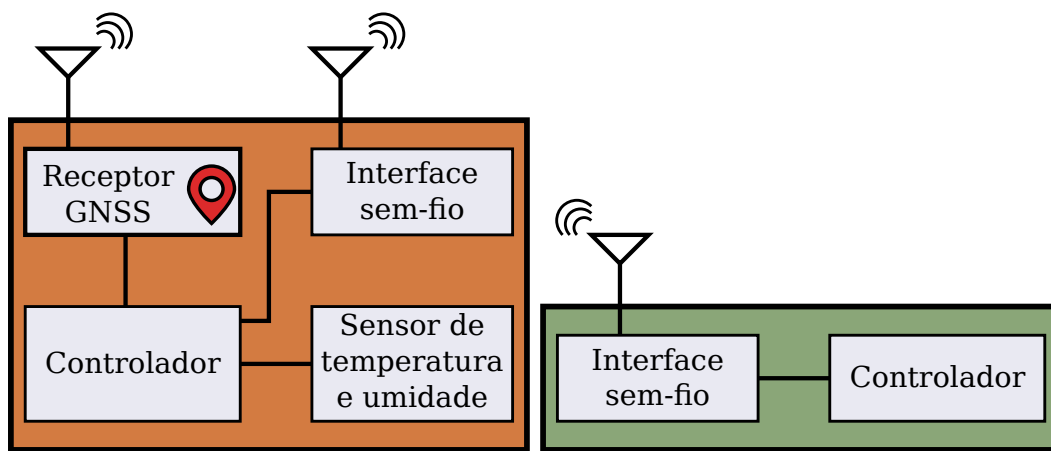
opera nas frequências de telefonia móvel (433 MHz, 868 MHz ou 915 MHz). Assim, a frequência de operação escolhida para o desenvolvimento da rede LoRa neste trabalho foi estabelecida em 915 MHz, baseado na distribuição de frequências da Anatel [32]. A Tabela 4.1 mostra o plano de frequências da tecnologia LoRa para diferentes regiões.

Tabela 4.1: Plano de frequências da tecnologia LoRa para diferentes regiões. O Ciclo de Trabalho* é dependente das regulamentações de cada país; os valores são descritos pelo padrão implementado em cada região

Modulação	Região	Frequências de operação (MHz)	Ciclo de trabalho*
LoRa	EU	433	$\leq 10\%$
		863-870	$\leq 0,1\%$
			$\leq 1\%$
			$\leq 10\%$
	AS	430	$\leq 1\%$
			$\leq 10\%$
		780	$\leq 1\%$
			$\leq 10\%$
US	902-928	$\leq 1\%$	
		$\leq 10\%$	

4.2 Protótipo Experimental Desenvolvido

Baseado em dispositivos de processamento, unidades de comunicação, sensores e fontes de comunicação como arquitetura básica dos objetos inteligentes [18], um protótipo foi implementado com duas unidades de comunicação LoRa com o intuito de realizar a avaliação desejada, configuradas como um dispositivo cliente e um dispositivo servidor.



(a) Arquitetura da unidade transmissora. (b) Arquitetura da unidade receptora.

Figura 4.1: Arquitetura do protótipo desenvolvido.

A arquitetura da unidade transmissora pode ser visualizada na Figura 4.1a. A unidade transmissora possui um controlador que gerencia as operações de sensoriamento, localização e comunicação. O sensoriamento é executado pelo sensor de temperatura e umidade, a localização é provida pelo receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e a comunicação é realizada pela interface sem-fio LoRa. A outra unidade é configurada apenas para receber mensagens e é denominada unidade receptora. A arquitetura da unidade receptora pode ser visualizada na Figura 4.1b. Esta é mais simples, composta basicamente de um controlador e uma interface sem-fio LoRa. As unidades transmissora e receptora fazem as vezes de um dispositivo cliente e um dispositivo servidor.

A Tabela 4.2 fornece a especificação dos componentes da unidade transmissora implementada para os experimentos. O controlador da unidade transmissora consiste em um Arduino Uno. O controlador está conectado a um módulo de GPS e a um módulo LoRa da Dragino [33], ambos no formato de escudo (*shield*). O módulo LoRa é baseado na placa RF96 da Semtech, que opera na frequência de 915 MHz. É utilizada uma antena de 7 dBi, do fabricante D-Link, para a transmissão do sinal LoRa. É utilizado um sensor DHT22 para capturar dados de umidade e temperatura. Uma fotografia do protótipo da unidade transmissora é mostrada na Figura 4.2.

Tabela 4.2: Componentes utilizados na unidade transmissora.

Módulo	Equipamento	Fabricante
Controlador	Arduino Uno R3	Arduino
Receptor GNSS	U-blox NEO-6M	DuinoPeak
Interface sem-fio	Escudo LoRa RF96	Dragino
Antena LoRa	Antena 7dBi	D-Link
Sensores	Sensor de Umidade DHT22	Aosong
	Sensor de Temperatura DHT22	Aosong



Figura 4.2: Protótipo experimental da unidade transmissora. Em ordem descendente, o módulo LoRa, o módulo GNSS, e a placa Arduino Uno. O sensor de temperatura aparece ao lado direito dos módulos interconectados. A antena da imagem corresponde à implementada no módulo LoRa, por meio de um conector SMA (*Sub-Miniature version A*). A antena aparece desconectada por motivo da imagem.

A unidade receptora, cujos equipamentos estão listados na Tabela 4.3, consiste em um Arduino Yún conectado a um módulo LoRa da Dragino, idêntico ao módulo utilizado na unidade transmissora. A placa Arduino Yún tem um sistema operacional Linux embarcado, o que permite interagir com o microcontrolador base do Arduino (Atmel), integrando outras linguagens de programação, maior capacidade de processamento e memória¹ Assim como na unidade transmissora, é utilizada uma antena de 7 dBi de fabricação da D-Link, porém, para a recepção do sinal LoRa. O protótipo da unidade receptora é mostrado na Figura 4.3.

Tabela 4.3: Componentes utilizados na unidade receptora.

Módulo	Equipamento	Fabricante
Controlador	Arduino Yún	Arduino
Interface sem-fio	Escudo LoRa RF96	Dragino
Antena LoRa	Antena 7 dBi	D-Link



Figura 4.3: Protótipo experimental da unidade receptora. Em ordem descendente, o módulo LoRa, a placa Arduino Yún. A antena corresponde à implementada no módulo LoRa, por meio de um conector SMA (*SubMiniature version A*). A antena aparece desconectada por motivo da imagem.

O módulo LoRa utilizado permite a comunicação com o Arduino por meio do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface bus*). O protocolo SPI [34] permite que o microcontrolador Arduino controle e se comunique de forma síncrona com outros dispositivos secundários, agindo como dispositivo mestre. O módulo de GPS utiliza comunicação serial com o controlador Arduino Uno. As unidades transmissora e receptora são programadas como dispositivos classe A, utilizando a biblioteca RadioHead². Assim sendo, este trabalho considera apenas a largura de banda com maior capacidade de transmissão de dados, menor tempo de transmissão, mas com perda de sensibilidade em comparação às outras larguras de banda disponíveis para a tecnologia LoRa [21]. A largura de banda usada é a de 500 kHz; da mesma

¹<https://www.arduino.cc/en/Products/Compare>

²<https://github.com/PaulStoffregen/RadioHead>.

forma, é considerado apenas o CR para causar a menor redundância na mensagem, porém com a menor sobrecarga de controle. O CR utilizado é $\frac{4}{5}$, e a potência de transmissão foi estabelecida em 14 dBm.

O controlador da unidade transmissora é programado de forma que, para cada valor de SF programado, sejam transmitidos pacotes, numerados de 0 a 50. Os pacotes são preenchidos com a numeração, as coordenadas de posição indicadas pelo GPS, assim como com a temperatura e a umidade medidas pelo sensor. O espaço restante em cada pacote é preenchido com caracteres aleatórios até que o mesmo esteja cheio. Os valores de SF programados são SF7, SF8, SF9, SF10 e SF11. É importante notar que os tamanhos de pacote variam de acordo com o valor utilizado para o SF. A Tabela 4.4 mostra os tamanhos de quadros usados para o experimento, foram usados tantos bits como for possível, até obter a máxima capacidade do quadro para cada SF. Para todos os SFs foram usados 64 bits de preâmbulo.

Tabela 4.4: Tamanho dos quadros para cada fator de espalhamento.

Fator de espalhamento	Tamanho do quadro (bits)
SF7	904
SF8	864
SF9	832
SF10	760
SF11	736

O controlador da unidade transmissora também envia o conteúdo das mensagens para sua interface USB (*Universal Serial Bus*) e um sinal quando a mensagem não é respondida por um receptor, após um intervalo de tempo configurado.

O controlador da unidade receptora, por sua vez, executa um código que recebe pacotes. A cada pacote recebido, são medidas a potência do sinal do enlace, a relação sinal-ruído (SNR) e também é obtida uma marca de tempo do controlador quando recebe uma mensagem. O controlador da unidade receptora, então, envia o pacote recebido e os dados medidos para a interface USB. O controlador Arduino Yún da unidade receptora é conectado por sua interface USB a um notebook, para que os pacotes e os dados sobre eles sejam armazenados. A placa Arduino Yún tem um sistema operacional Linux embarcado que permite à unidade receptora ter uma marca de tempo sem depender de um notebook. Além disso, planeja-se desenvolver sistemas embarcados de baixo custo, que consigam fazer processamento de pacotes e entre outras funções do *gateway* do LoRaWAN.

4.3 Cenário dos Experimentos

Para a implementação do protótipo experimental, foram montados os módulos da unidade transmissora e receptora em caixas plásticas, como é mostrado na Figura 4.4a. As caixas foram instaladas em hastes para obter uma linha de visada com a menor obstrução possível entre a unidade transmissora e a unidade receptora, como é mostrado na Figura 4.4b.

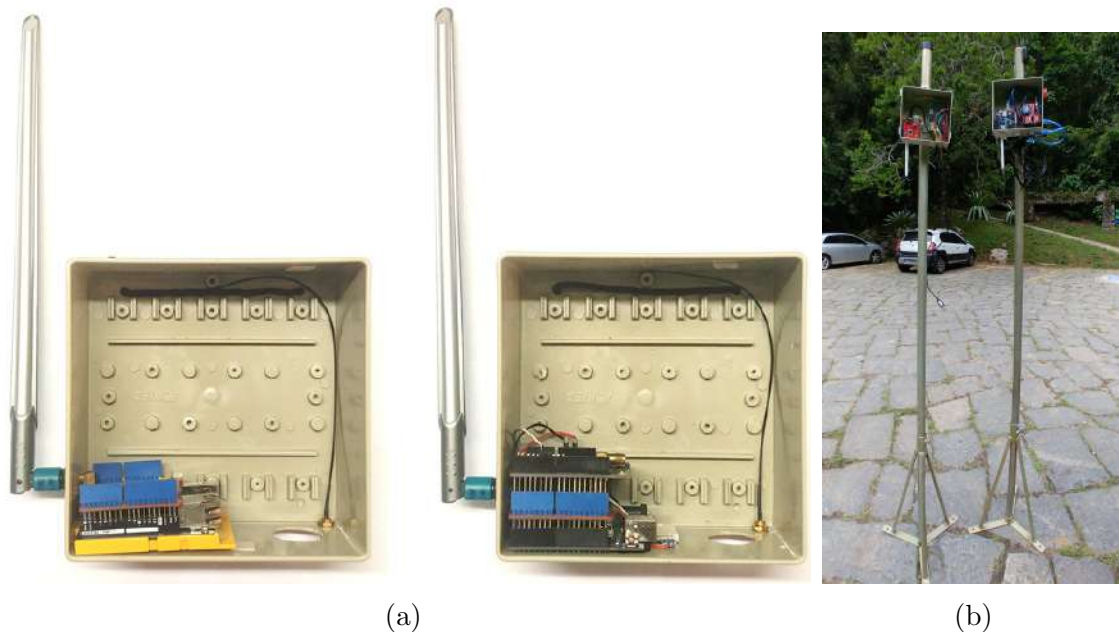


Figura 4.4: Protótipos do experimento. (a) Unidade transmissora e unidade receptora. (b) Caixas instaladas em hastes de 2 m de altura.

Foram realizados experimentos em cenários em três ambientes distintos. O primeiro foi um ambiente *indoor*, dentro dos corredores de um prédio. Dois ambientes *outdoor* foram experimentados: um ambiente de floresta, em um parque nacional, e um ambiente de espaço livre, no campus da UFRJ na Ilha do Fundão.

O cenário utilizado para a avaliação da tecnologia LoRa em um ambiente *indoor* é mostrado na Figura 4.5b. O local utilizado foi o bloco H do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Rio de Janeiro (UFRJ). A Figura 4.5a mostra a localização do prédio aonde foi realizado o experimento. Para isso, foi testado o enlace da unidade transmissora e receptora no corredor do terceiro, segundo e primeiro andar do bloco H. O prédio possui uma particularidade. Apenas no terceiro andar há um corredor, completamente desobstruído e em linha reta, de uma ponta a outra do edifício. Este corredor possui comprimento de aproximadamente 170 m. O corredor do segundo andar possui um conjunto de salas localizado aproximadamente no meio de seu comprimento, constituindo um obstáculo à propagação de ondas de rádio. Já o corredor do primeiro andar corre apenas por metade do bloco. No outro lado,

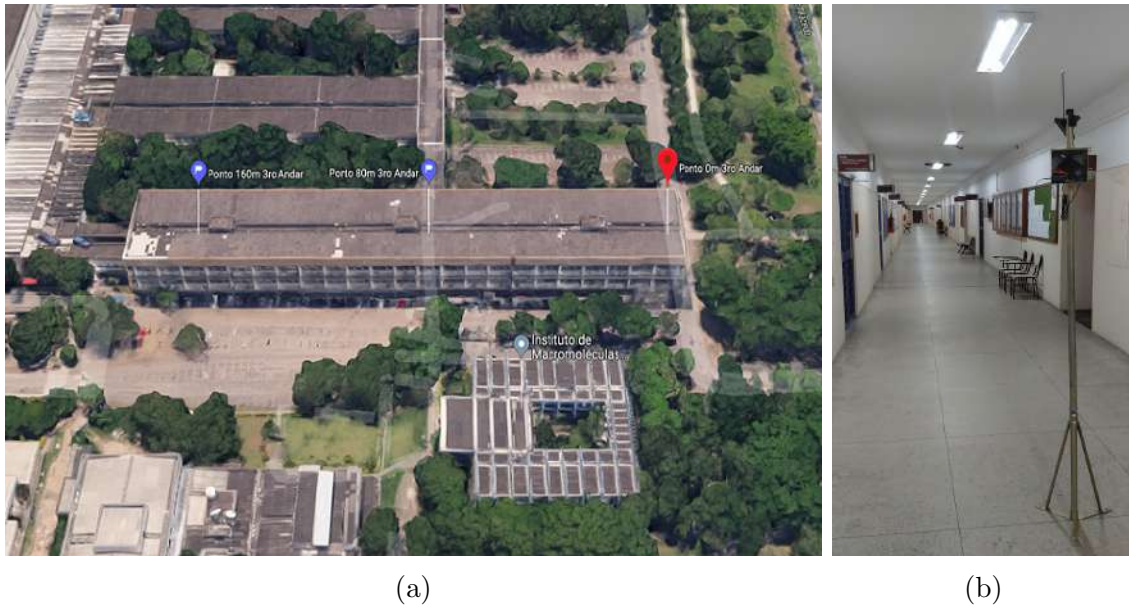


Figura 4.5: Cenário e equipamentos do protótipo desenvolvido. (a) Local dos experimentos *indoor* na UFRJ. (b) Local de teste.

existe um restaurante. Assim, os corredores nos três andares foram utilizados para experimentos em diferentes condições. No terceiro andar, pôde-se avaliar a comunicação com linha de visada (*Line of Sight* - LoS), a três distâncias: 0 m, 80 m, e 160 m. No segundo e primeiro andares, foram realizados experimentos em condições sem linha de visada (*Non Line of Sight* - NLoS). Duas distâncias foram avaliadas: 80 m e 160 m, em paralelo com respeito aos pontos de 80 m e 160 m medidos no terceiro andar. A Figura 4.6 mostra uma ilustração do cenário dentro do prédio.

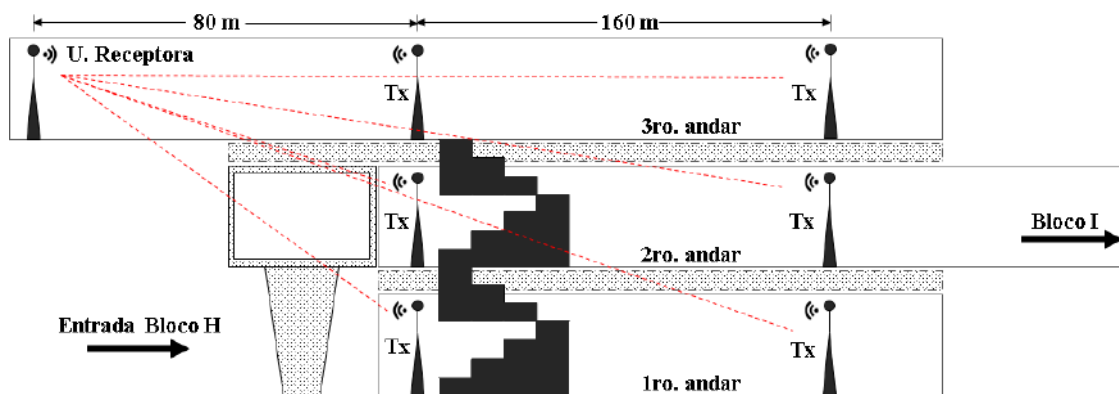


Figura 4.6: Ilustração do ambiente do cenário *indoor*.

O cenário utilizado para os experimentos e as medições para avaliação da tecnologia LoRa em campo aberto foi o campus da Ilha do Fundão da UFRJ. Foi estabelecido um ponto para a localização da unidade receptora no sétimo andar do bloco A, e cinco pontos para a localização da unidade transmissora, de forma que, em diferentes momentos, a unidade transmissora estivesse a uma distância de

0 m, 500 m, 1000 m, 1500 m e 2000 m da unidade receptora, como é mostrado na Figura 4.7(reproduzido do [35]). Buscaram-se locais que possuíssem o mínimo de fontes de interferência entre si, e dentro do possível, linha de visada com mínimas interferências.



Figura 4.7: Local dos experimentos *outdoor* - Campo Aberto (reproduzido do Google Maps).

A Figura 4.8a (reproduzido do [35]), mostra o cenário utilizado para os experimentos em ambientes externos com diferentes condições atmosféricas e vegetação densa, no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO). O intuito de testar o protótipo nesse cenário foi avaliar o alcance de transmissões de rádios sem-fio da tecnologia LPWAN na Mata Atlântica, aonde as variações de ambiente são constantes, e influem de forma adversa na propagação de ondas de rádio. Para isso, foram disponibilizados os protótipos desenvolvidos para testar a comunicação entre as unidades dentro da floresta, em um projeto relacionado e desenvolvido no laboratório do Grupo de Teleinformática e Automação (GTA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), investiga-se um sistema de monitoramento e localização de visitantes em parques naturais. A meta principal é auxiliar e dar mais segurança aos visitantes nas trilhas do parque, como a ilustrada na Figura 4.8b. Foi estabelecido um ponto para a localização da unidade receptora, e foram estabelecidos pontos de medição espaçados a cada 25 m, até os 125 m (distância até onde se obteve comunicação entre as unidades transmissora e receptora).

Após a descrição dos cenários neste capítulo, o Capítulo 5 mostra os resultados dos experimentos realizados nestes ambientes com os protótipos desenvolvidos. Para avaliar o comportamento da tecnologia LoRa, foram analisadas as métricas de desempenho obtidas através dos *Shields* da tecnologia LoRa, receptor GNSS, e das placas de desenvolvimento Arduino.

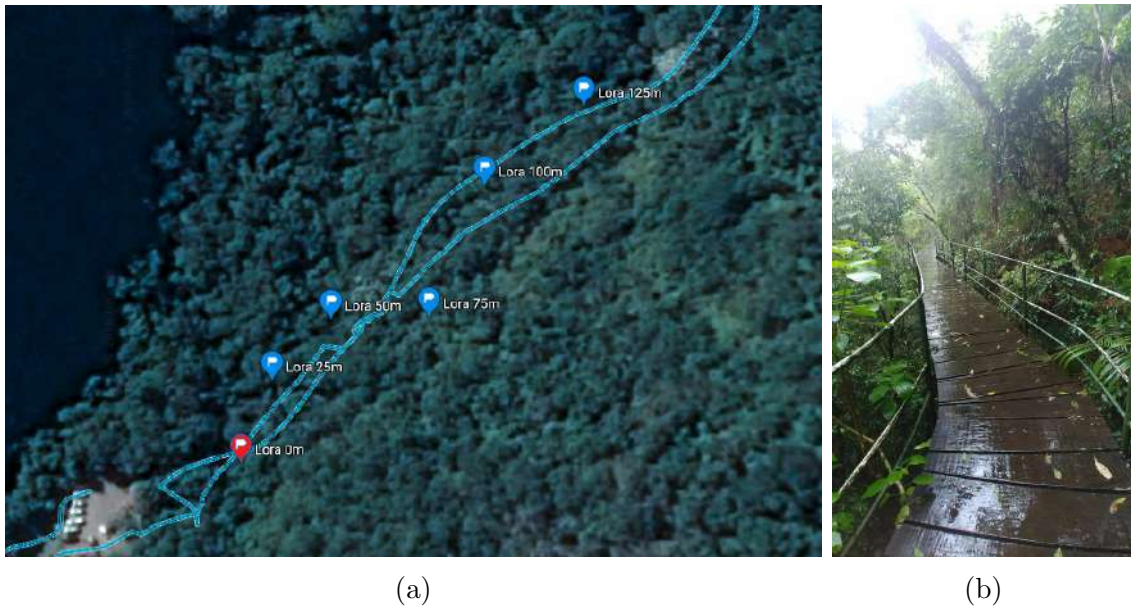


Figura 4.8: Local dos experimentos *outdoor* - Floresta. (a) Local dos experimentos no PARNASO (reproduzido do Google Maps). (b) Exemplo de trilha para o teste.

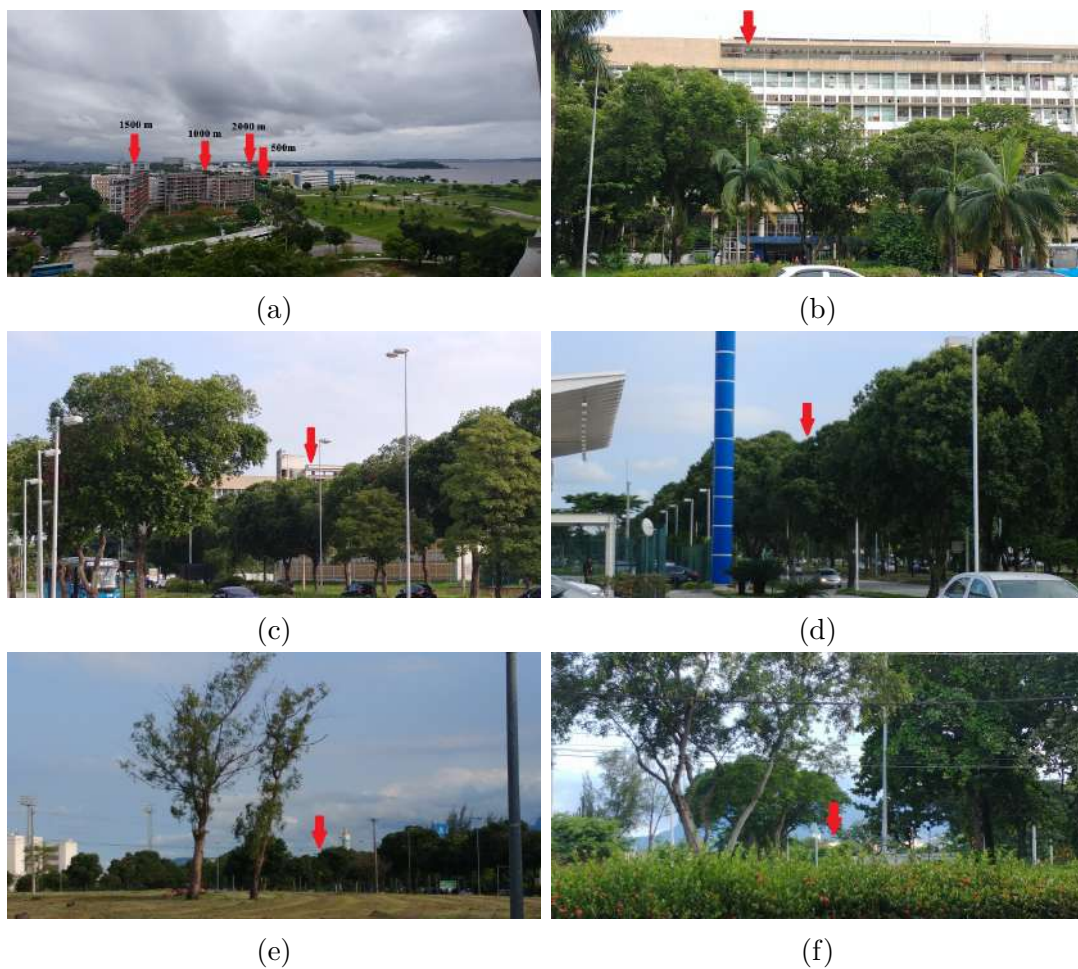


Figura 4.9: Características do cenário *outdoor* - Campo Aberto. (a) mostra a localização com setas da unidade transmissora em diferentes distâncias. ((b), (c), (d), (e), (f)) mostram a localização com setas da unidade receptora à distância.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da análise da comunicação entre as unidades transmissora e receptora LoRa. São apresentados resultados mostrando o intervalo de tempo entre o início e o fim da recepção de dados na unidade receptora, taxa de perda, vazão, potência de sinal e a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR). Os resultados são tratados com ferramentas estatísticas, sendo mostrados com intervalos de confiança nos gráficos. Os resultados foram obtidos em três cenários: *indoor*, *outdoor* em campo aberto e *outdoor* em ambiente de floresta.

5.1 Resultados no Espaço *Indoor*

Como é descrito no Capítulo 4, foram estabelecidos dois testes, um com linha de visada (LoS) e outro sem linha de visada (NLoS). Este experimento foi considerado para avaliar o desempenho da tecnologia LoRa em presença de edificações. O tempo de recepção foi calculado como o intervalo de tempo entre o início e o fim da recepção de dados na unidade receptora, e comparado com o tamanho dos quadros enviados para cada fator de espalhamento, mostrados na Tabela 4.4. As medições feitas consistem na variação do SF para cada medida, sendo feitas 10 repetições de cada SF a cada distância estabelecida para o experimento.

5.1.1 Medidas no terceiro andar - em LoS

O terceiro andar do bloco H do Centro de Tecnologia da UFRJ foi utilizado como cenário de avaliação de ambiente *indoor*, porém em condição de linha de visada (LoS). Para avaliar o desempenho do LoRa no terceiro andar, a unidade receptora ficou estática na posição 0 m, enquanto a unidade transmissora realizava a transmissão de dados na posição de 0 m, 80 m, e 160 m respectivamente. O teste foi feito para estabelecer um padrão de comportamento das unidades para cada uma das distâncias, e verificar se há variação, apesar de haver linha de visada nas três

medições.

Tempo de Recepção: O tempo de recepção foi obtido dos dados recebidos na unidade receptora. Assim, o tempo de recepção calculando a diferença entre a marca de tempo do último pacote recebido, e a marca de tempo do primeiro pacote recebido. A Figura 5.1 mostra a variação de tempo para cada tamanho de pacote estabelecido para cada SF. Como foi explicado no Capítulo 4, foram usados tantos bits quanto possível, até obter a máxima capacidade do quadro para cada SF. A diferença de tempos entre o SF7 e o SF11 é maior de 60s, sendo está última a que maior tempo leva para receber os dados, $\pm 95s$. No entanto, o tempo de recepção de um SF estar em torno do tempo de recepção de um outro são mínimas, devido à margem de erro obtida para cada medição. Como será visto ao longo dos resultados relacionados com o tempo, esse padrão vai se manter para as diferentes testes do experimento *indoor*.

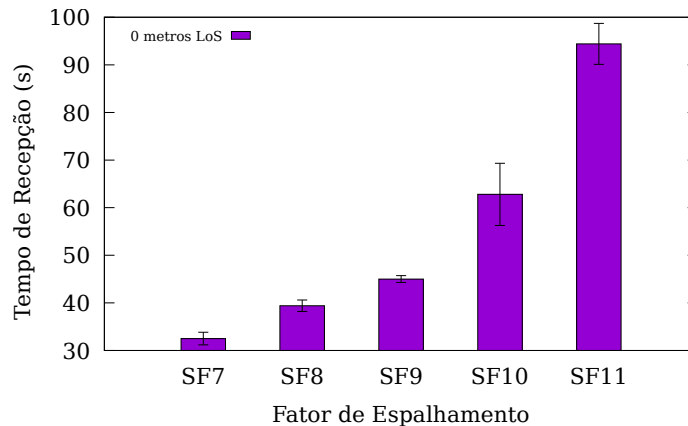


Figura 5.1: Tempos de recepção em ambiente *indoor* com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).

Taxa de Perda de Pacotes: A taxa de perda para as medições do terceiro andar mostram uma diferença estatística importante com respeito ao SF11. A Figura 5.2 mostra a variação da taxa de perda para as três distâncias utilizadas. Observa-se que o SF11 teve a maior perda de pacotes, variando até um 13%, quando comparada à taxa de perda observada para os outros SFs. Esta diferença pode ser atribuída à relação de tempos e distância de operação para cada SF. Para o SF7 não houve perda nenhuma, enquanto a perda nos outros SF não foi superior a 4%. Por outro lado, as barras de erro se mantiveram estáveis, o que quer dizer que a perda de pacotes tende a se manter nesse nível.

Vazão: A vazão do enlace foi avaliada baseado no tempo de chegada do primeiro pacote, e o tempo de chegada do último pacote recebido para cada SF, o tamanho do quadro de cada SF, para cada distância mensurada. A Figura 5.3 mostra que a vazão é igual estatisticamente para todos os SFs em cada distância avaliada. Assim

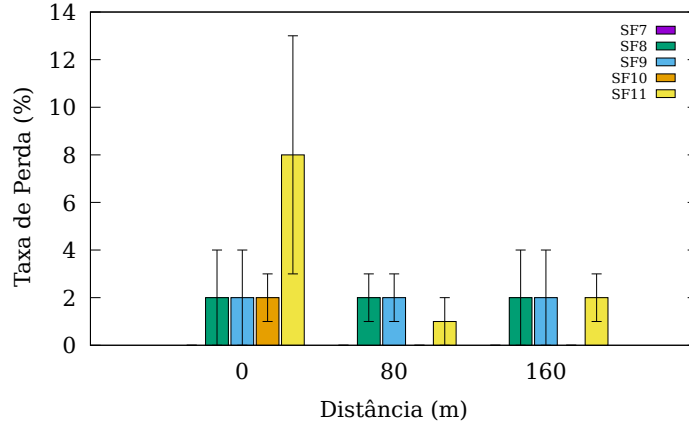


Figura 5.2: Taxa de perda em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).

pois, é possível estabelecer um padrão do número de bits que podem ser transmitidos sobre a rede para a arquitetura implementada neste experimento.

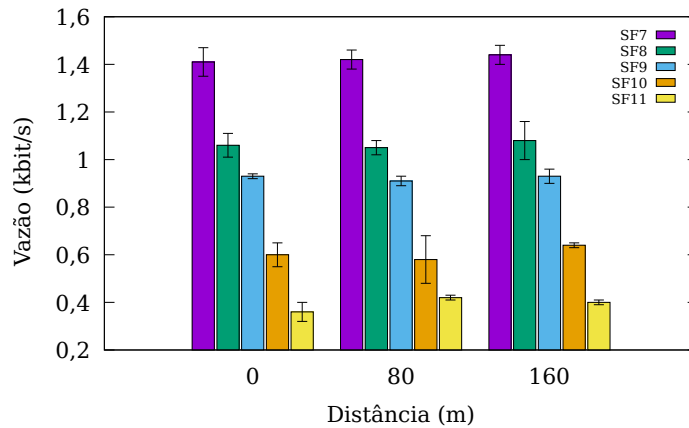


Figura 5.3: Vazão obtida em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).

Potência do Sinal: A Figura 5.4 mostra o comportamento da potência do sinal para o cenário do terceiro andar. Inicialmente, de 0 m para 80 m observa-se uma queda de potência considerável, tendo em conta que é uma variação de 80 m, diminuindo de aproximadamente -40 dBm no pior dos casos (SF7) na distância de 0 m, para aproximadamente -73 dBm no mesmo caso. Logo depois, na variação de 80 m para 160 m, a potência do sinal continua tendo uma queda, mas não tão pronunciada quanto a anterior, tendo uma queda máxima de -25 dBm aproximadamente, neste caso para o SF10. Portanto, é possível concluir a partir daqui, que pelas qualidades de longo alcance do LoRa, é provável que possam ser atingidas maiores distâncias em espaços fechados, considerando o enlace em condição de *LoS*, isto dado que a sensibilidade de recepção de dados que pode ser até de -130 dBm.

Relação Sinal-Ruído: Sendo um indicador importante para representar a qua-

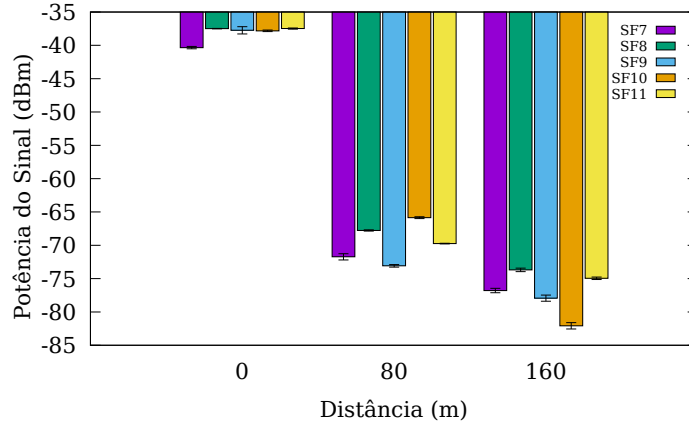


Figura 5.4: Potência do sinal em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).

lidade do sinal, a SNR permite prever a quão boa pode ser a comunicação por um enlace. O comportamento da relação sinal-ruído no cenário do terceiro andar mostra uma particularidade, e é que a medida que a unidade transmissora se afasta da unidade receptora, a SNR aumenta, em relação a 0 m (isso especificamente na distância de 80 m). Na Figura 5.5 se percebe essa variação. Isto pode estar associado com o tempo de transmissão definido para cada SF. Também se ressalta que a potência do sinal é maior do que a potência do ruído, de onde se pode concluir que as transmissões nesse espaço não serão influenciadas por interferências produzidas pela estrutura.

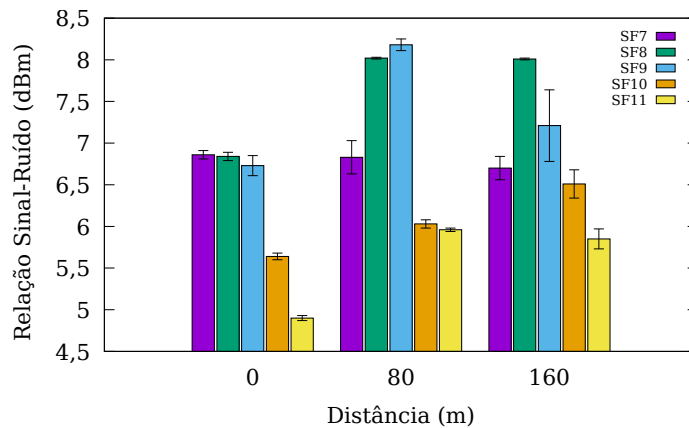


Figura 5.5: Relação Sinal-Ruído em função da distância com LoS (terceiro andar do bloco H do CT/UFRJ).

5.1.2 Medidas entre Andares - NLoS - 80 metros

Para avaliar o desempenho do LoRa em ambientes *indoor* em condições sem linha de visada (NLoS), foram realizados diferentes experimentos, entre os andares, para

simular diferentes condições de propagação. Os experimentos foram agrupados de acordo com a distância entre as unidades, de 80 m ou 160 m.

Para avaliar o desempenho do LoRa entre andares do edifício, se estabeleceram pontos paralelos entre a unidade receptora estática no terceiro andar na posição de 0 m, e a unidade transmissora deslocando-se a 80 m no terceiro andar (LoS), 80 m no segundo andar, em paralelo com o ponto de 80 m do terceiro andar (NLoS), e 80 m no primeiro andar, em paralelo aos pontos do segundo e terceiro andar (NLoS).

Tempo de Recepção: Na Figura 5.6 observa-se o tempo de recepção para a distância de 80 m desde o primeiro, segundo e terceiro andar. As medições estão agrupadas por SF, com o intuito de comparar se houve alguma diferença nos tempos de recepção. Com respeito ao tempo de recepção nos SF7, SF9 e SF11, esses tempos aconteceram nos mesmos intervalos de tempo, ou seja, não foi observada diferença estatística de um andar para o outro. Com respeito ao SF8 e SF10, eles tiveram uma variação estatística considerável. No caso do SF8, houve uma variação de ± 15 s, enquanto o SF10 teve as barras de erro variando bastante, em ± 40 s. Contudo, o ponto central das barras de erro se concentra em uma faixa de não mais de 10 s para o SF8, e de não mais de 15 s para o SF10.

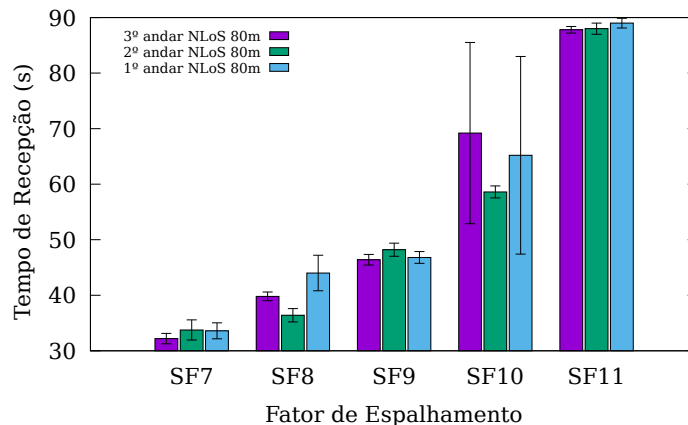


Figura 5.6: Tempos de recepção em ambiente *indoor* em NLoS para a distância de 80 m.

Taxa de Perda de Pacotes: A taxa de perda no cenário de 80 m teve variações a serem consideradas com respeito ao cenário do terceiro andar. A Figura 5.7 mostra que no Terceiro e segundo andar a perda foi mínima em comparação com o primeiro andar. É possível intuir que esse comportamento se justifica por conta da interferência da construção desde a base do edifício. No primeiro andar, os SF7 e SF11 tiveram menor variação com respeito aos outros andares, enquanto o SF10 teve a maior margem de erro, chegando a alcançar uma taxa de 12% de perda em algum ponto.

Vazão: A Figura 5.8 mostra o comportamento da vazão para o cenário de 80 m.

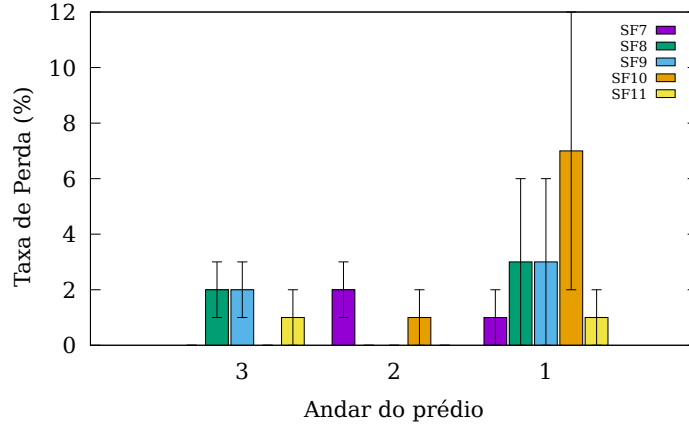


Figura 5.7: Taxa de perda em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.

Da mesma forma que no cenário do terceiro andar, houve variação significativa para o SF8 na medição do primeiro andar. Isto está de acordo com as flutuações de tempo observadas na Figura 5.6, ou perda de pacotes, que foi variável nos três andares, como foi observado na Figura 5.7.

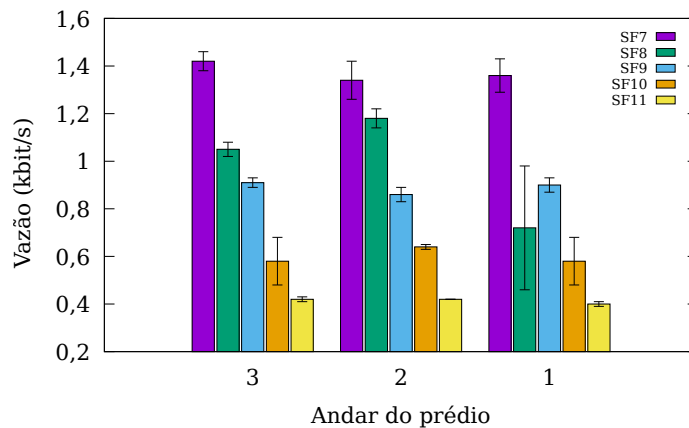


Figura 5.8: Vazão em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.

Potência do Sinal: A potência do sinal para o teste de 80 m teve um comportamento similar ao experimento do terceiro andar, com a diferença da variação entre andares. Assim, o SF7 teve a maior queda entre o Terceiro e o segundo andar, descendo de -71 dBm para -120 dBm. Com respeito ao primeiro andar, a queda mais brusca aconteceu com o SF10, caindo de -65 dBm para -121 dBm. A Figura 5.9 mostra as variações de potência para 80 m.

Relação Sinal-Ruído: A relação sinal-ruído resultante do experimento de 80 m mostra-se na Figura 5.10. Já no segundo e primeiro andar o SNR é negativo, caindo até -12 dBm no pior dos casos (SF8). Da mesma forma, o SNR no primeiro andar tem tendência a experimentar mais problemas de conectividade por conta da estrutura

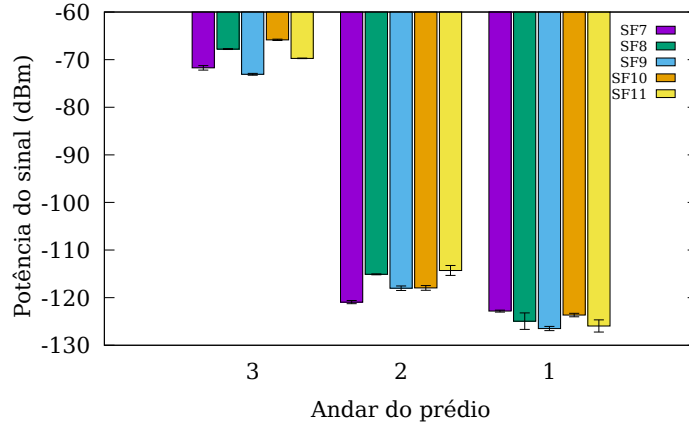


Figura 5.9: Potência do sinal em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.

da edificação, que como se pode observar na Figura 5.7, já vem apresentando maior perda no enlace.

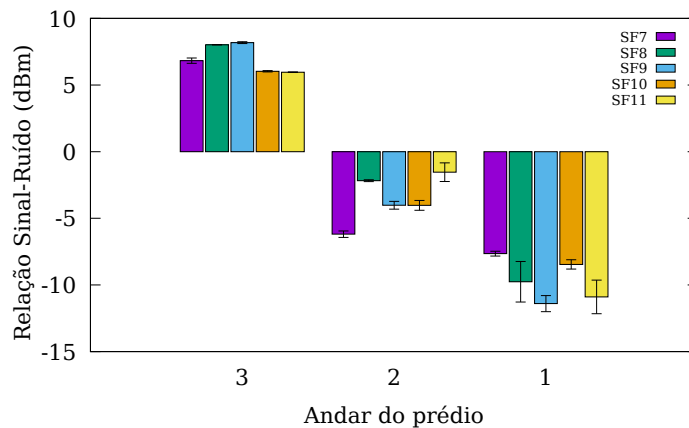


Figura 5.10: Relação Sinal-Ruído em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 80 m.

5.1.3 Medidas entre Andares - NLoS - 160 metros

Da mesma forma que no experimento de 80 m, foram estabelecidos pontos paralelos entre a unidade receptora estática no terceiro andar na posição de 0 m, e a unidade transmissora deslocando-se a 160 m no terceiro andar (LoS), 160 m no segundo andar, em paralelo com o ponto de 80 m do terceiro andar (NLoS), e 160 m no primeiro andar, em paralelo aos pontos do segundo e terceiro andar (NLoS).

Tempo de Recepção: O tempo de recepção na distância de 160 m apresenta medidas estáveis, com exceção do SF10, que apresenta variações nas barras de erro de aproximadamente 30 s. No entanto, o ponto central das barras de erro se concentra em uma faixa de não mais de 10 s. Da mesma forma que os outros testes, apresenta

tempos de recepção similares, em média. A Figura 5.11 mostra o comportamento do tempo de recepção no experimento em 160 m.

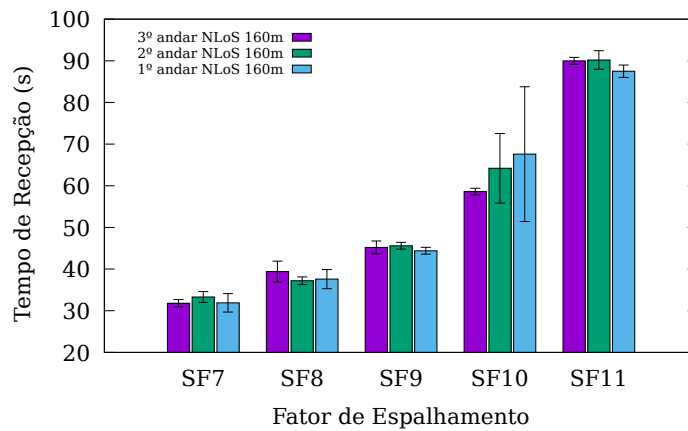


Figura 5.11: Tempos de recepção em ambiente *indoor* em NLoS para a distância de 160 m.

Taxa de Perda de Pacotes: Para a distância de 160 m, a taxa de perda se mantém estável a comparação dos resultados de taxa de perda dos experimentos do terceiro andar e 80 m, sendo que as barras de erro se mantiveram com uma variação de até 2%, sendo a máxima taxa de perda de até 4%. A Figura 5.12 mostra a similaridade dos resultados no quesito de porcentagem de perda.

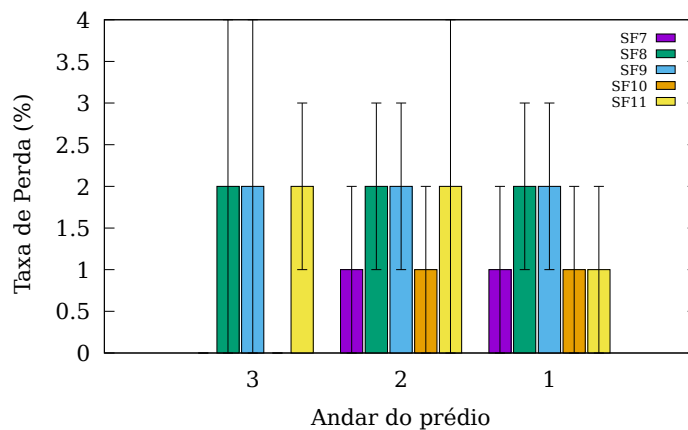


Figura 5.12: Taxa de perda em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.

Vazão: A vazão no experimento de 160 m se mantém estável como no experimento do terceiro andar. A Figura 5.13 mostra que não há diferença estatística de um andar para outro, e assim mesmo que não há variação na vazão da comunicação em nenhum dos SFs avaliados.

Potência do Sinal: A variação do nível de potência é mostrada na Figura 5.14. A diferença está no experimento de 80 m, onde a potência do sinal não diminuiu

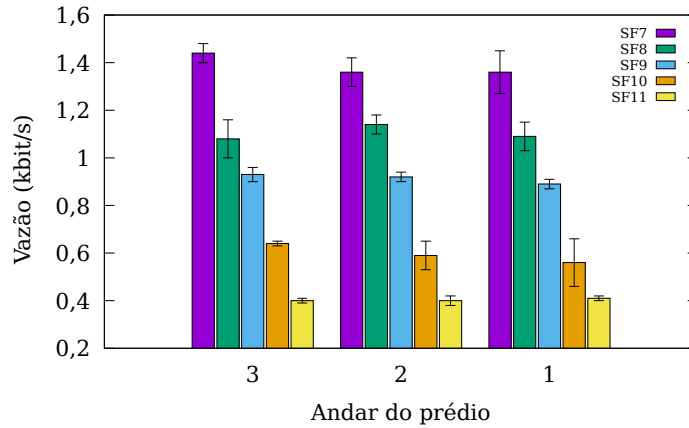


Figura 5.13: Vazão em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.

tão drasticamente. Assim, o SF7 variou de -77 dBm para -107 dBm, enquanto que o SF9 teve uma variação de -78 dBm para -105 dBm, sendo diferenças de -30 dBm e -27 dBm respectivamente, diferente do experimento de 80 m que mostrou uma queda de -48 dBm e -45 dBm no SF7 e SF9 respectivamente. Por outro lado, o nível mais baixo de potência foi alcançado pelo SF7 e SF11 no primeiro andar, com -123 dBm; no experimento de 80 m, a queda de potência chegou até -125 dBm no SF9, o que permite intuir que a interferência que apresentou a estrutura do edifício no experimento de 160 m foi menor que a do experimento de 80 m.

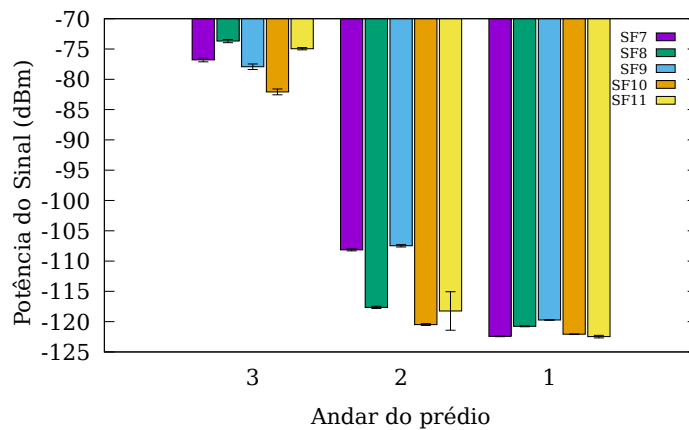


Figura 5.14: Potência do sinal em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.

Relação Sinal-Ruído: Ao invés de apresentar maior relação sinal-ruído, o experimento de 160 m apresentou menor margem entre a potência do sinal e a potência do ruído. Partindo deste ponto, é possível concluir que o sinal do enlace em 160 m teve menor oposição da estrutura física do edifício que o sinal do enlace em 80 m, o que fortalece a teoria de maior oposição por parte da estrutura nos locais aonde foi alocada a antena da unidade transmissora em 80 m. A Figura 5.15 mostra o

comportamento da relação sinal-ruído para 160 m. O SNR mais baixo foi observado no SF11, menor de -8 dBm, enquanto em 80 m, no mesmo SF11, o SNR foi maior de -10 dBm.

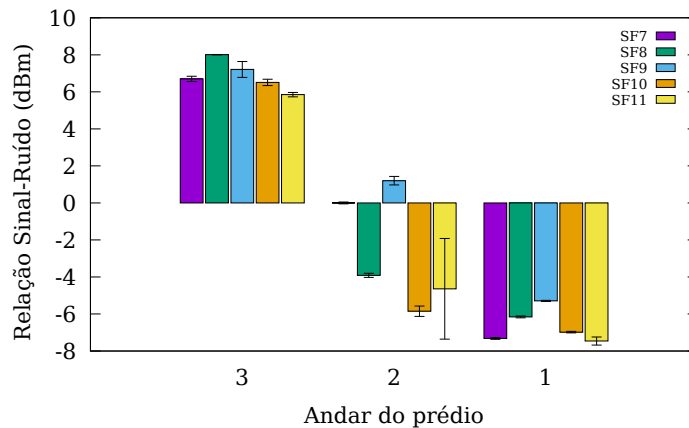


Figura 5.15: Relação Sinal-Ruído em função do posicionamento entre andares em NLoS para a distância de 160 m.

5.2 Resultados *Outdoor* - Campo Aberto

Nesta seção, são apresentados os resultados das medidas no segundo cenário de experimentação, em campo aberto. Foram realizadas medições a diferentes distâncias, no campus da Ilha do Fundão da UFRJ. Foi estabelecido um ponto para a localização da unidade receptora no sétimo andar do bloco A, e cinco pontos para a localização da unidade transmissora, de forma que, em diferentes momentos, a unidade transmissora estivesse a uma distância de 0 m, 500 m, 1000 m, 1500 m e 2000 m da unidade receptora. A Figura 4.9 mostra os pontos escolhidos dentro do campus da UFRJ. Foram procurados pontos com a menor interferência possível. As medições feitas consistem na variação do SF para cada medida, sendo feitas 10 repetições de cada SF a cada distância estabelecida para o experimento.

5.2.1 Taxa de Perda de Pacotes

Os resultados associados à taxa de perda do envio de pacotes entre as duas unidades são apresentados na Figura 5.16. Para isso, foi avaliada a porcentagem de pacotes perdidos a diferentes distâncias, para diferentes valores de SF. Enquanto o SF11 apresenta uma certa quantidade de perdas na distância de 0 m, verifica-se pela barra de erro que os resultados variaram bastante, apontando para alguma fonte de interferência ocasional. Já o SF7 teve a maior perda entre todas as configurações, à maior distância, de 2000 m. Porém, na distância de 1000 m, observa-se uma taxa

de perda de 25%. Acredita-se que esta degradação do sinal representada em perda de pacotes para o SF7 está associada à vegetação presente no cenário no qual foi desenvolvido o experimento. A vegetação do local pode ter gerado obstáculos suficientes para impedir a entrega de uma significativa proporção dos pacotes. O ponto de 1000 m de distância é o único no qual há alguma vegetação entre a unidade transmissora e a unidade receptora. A Figura 4.9d permite ver a densidade de vegetação no ponto de 1000 m. Para os outros fatores de espalhamento, o comportamento foi de acordo com esperado: a perda em maiores distâncias é reduzida conforme há um aumento no fator de espalhamento. Por exemplo, o fator SF7 apresenta uma perda de 50% de pacotes em 2000 m, enquanto o SF11 apresenta uma perda de 14%.

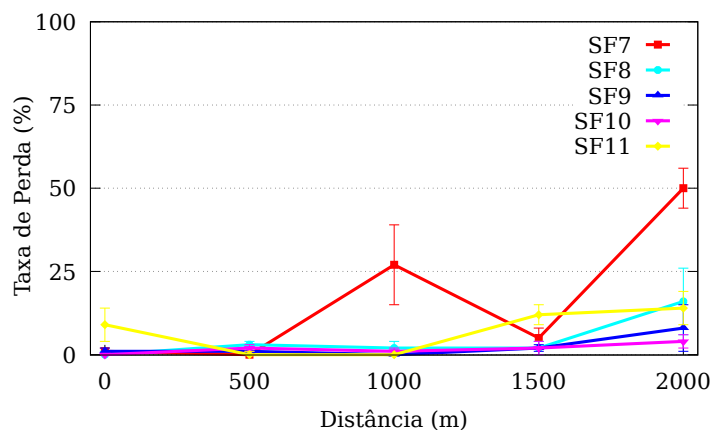


Figura 5.16: Taxa de perda em função da distância em ambiente de campo aberto.

5.2.2 Vazão

Foi avaliada a vazão do enlace baseada no tempo de chegada do primeiro pacote, e o tempo de chegada do último pacote para cada SF, o tamanho do quadro para cada SF, e cada distância. Como se pode observar na Figura 5.17, a máxima vazão foi obtida para o SF7, pois esse está configurado para transmitir uma maior quantidade de dados, porém, como já foi mostrado na avaliação da taxa de perda, o SF7 tem uma queda abrupta na vazão em 1000 m. Os outros resultados mostram resultados semelhantes com os que têm sido descritos da tecnologia: em distâncias maiores, a taxa de transmissão de dados é menor, assim como o tempo de transmissão é maior, o que se pode ver representado na redução da taxa de transmissão para cada SF.

5.2.3 Potência do Sinal

A Figura 5.18 mostra o comportamento da potência do sinal no enlace. Inicialmente, a queda de potência é abrupta, diminuindo de -40 dBm para -112 dBm em 500 m, e logo mantendo-se estável conforme há mais aumento da distância, até os

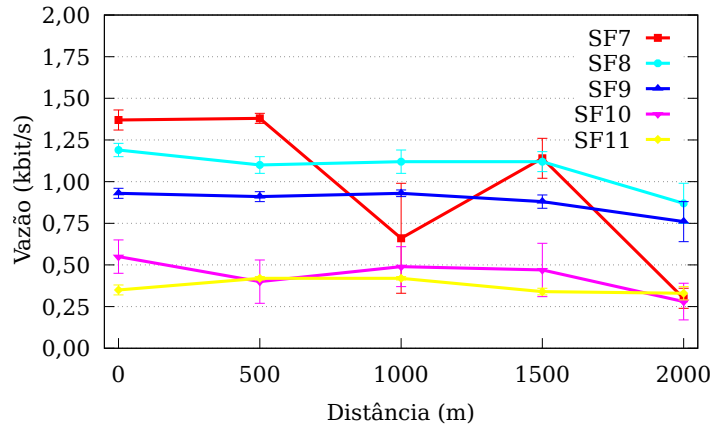


Figura 5.17: Vazão em função da distância em ambiente de campo aberto.

-124 dBm. Com isso, a atenuação da potência do sinal do enlace diminui proporcionalmente com o aumento da distância e, pelas características de potência de sinal do enlace com a tecnologia LoRa (sensibilidade de recepção de dados até -148 dBm [33]), é possível concluir que o enlace com o *hardware* implementado pode ter um maior alcance do que foi possível atingir nos experimentos. Também é possível observar que na distância de 1000 m, o SF7 teve a menor potência do sinal, o que pode ser diretamente associado à taxa de perda observada nessa distância, no Capítulo 5.2.1, apresentando uma queda leve de potência em comparação com a potência do sinal para a seguinte distância (1500 m).

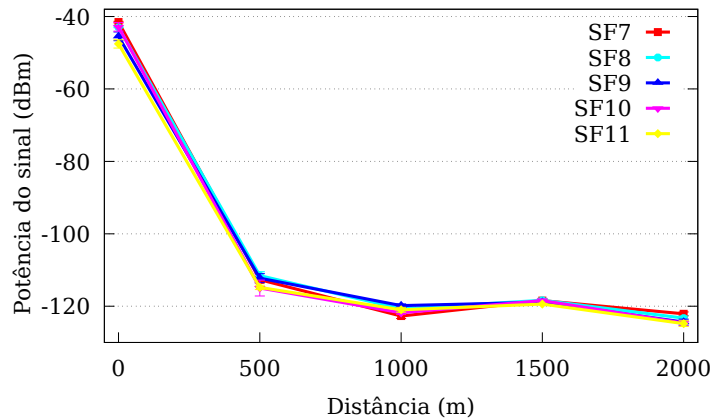


Figura 5.18: Potência do sinal em função da distância em ambiente de campo aberto.

5.2.4 Relação Sinal-Ruído

Outro resultado obtido no experimento está associado à SNR. Sendo um indicador importante para representar a qualidade do sinal, a SNR permite prever o quão boa pode ser a comunicação por um enlace. Assim, foram obtidos dados da SNR no experimento, apresentados na Figura 5.19. Foram obtidos valores positivos

de SNR, o que indica que a potência do sinal é maior que a potência do ruído. Já os valores negativos indicam que a potência do sinal recebido é menor que a potência do ruído, porém, não o suficiente para impedir a recepção no enlace. Por outro lado, pode-se observar que a menor SNR apresenta-se no SF11, porém, também se observa que independente da taxa de transmissão usada, a SNR decresce com o aumento da distância.

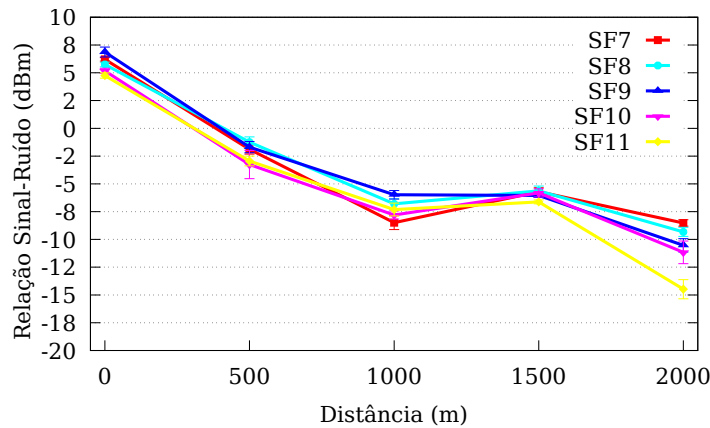


Figura 5.19: Relação Sinal-Ruído em função da distância em ambiente de campo aberto.

5.2.5 Comparação da Vazão Obtida com a Vazão Teórica

A partir dos valores calculados para a taxa de transmissão teórica de cada fator de espalhamento, exibidos na Tabela 2.2 e dos valores para a taxa de transmissão medidos com o protótipo, ilustrados na Figura 5.17, é possível comparar as taxas obtidas na prática com as taxas esperadas teoricamente. A Figura 5.20 ilustra o valor percentual das taxas de transmissão obtidas na prática quando comparadas com as taxas de transmissão teóricas. Os resultados obtidos mostraram uma porcentagem baixa de relação entre as taxas de transmissão teórica e prática. Isso pode estar associado à implementação de retardos no protótipo implementado, porém, não impede dizer que o padrão de comunicação está dentro das taxas que é possível transmitir para a tecnologia.

5.3 Resultados *Outdoor* - Floresta

Com o intuito de implantar redes sem-fio em parques florestais, visando oferecer segurança e monitoração da presença de pessoas, foi utilizado o protótipo experimental desenvolvido neste trabalho para avaliar o alcance do LoRa. Para isso, são realizadas medições de campo na sede de Teresópolis do Parque Nacional da

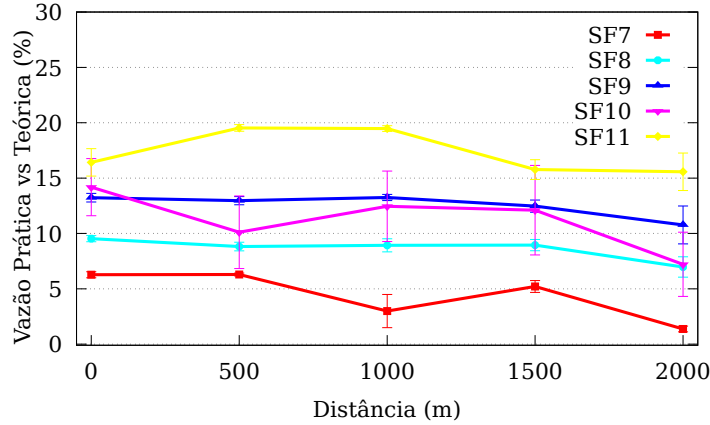


Figura 5.20: Comparação da vazão medida com a vazão teórica segundo o fator de espalhamento LoRa.

Serra dos Órgãos (PARNASO), em trilhas com vegetação densa típicas do bioma da Mata Atlântica. Essa vegetação afeta gravemente a propagação. Adicionalmente, as medições foram realizadas em diferentes condições atmosféricas, porém, foram priorizadas as medições feitas sob chuva. A escolha das piores condições de testes deve-se ao fato de que o desaparecimento de pessoas que visitam as trilhas do parque ocorre com mais frequência em dias de tempo ruim.

São utilizados uma unidade receptora, fixa, e uma unidade transmissora, móvel, responsáveis pelo envio e recepção dos pacotes de teste. Os testes são feitos com o envio de 200 pacotes, repetidos três vezes para cada ponto. Os pontos de medição foram espaçados com distâncias entre 0 m e 125 m, com um incremento de 25 m em cada medição. As barras de erro foram determinadas a partir do desvio padrão. Foi utilizada a seguinte configuração para os módulos de LoRa:

- fator de espalhamento: SF7;
- largura de banda: 500 kHz;
- taxa de código: $4/5$.

Os dados transportados em cada pacote gerado pela unidade transmissora, transportam a tupla com a seguinte informação: número de sequência, data, hora, latitude, longitude, altura, temperatura, e umidade. Foi configurado o SF7, com o intuito de garantir a capacidade em taxa de bits do pacote enviado, a largura de banda com maior capacidade de transmissão de dados, 500 kHz. A taxa de código configurada foi de $4/5$, para ter a menor redundância na mensagem.

5.3.1 Taxa de Perda de Pacotes

Devido à curta distância entre a unidade receptora e a unidade transmissora, a baixa taxa de perda para os primeiros testes era esperada. Já com a localização da unidade transmissora perdendo linha de visada com a unidade receptora pelo traçado quebrado da trilha, começou se observar perda de pacotes na distância de 100m, com aproximadamente 40% pela indicação da variação das barras de erro. Em 125m já a detecção do sinal foi nulo, pelo que a taxa de perda foi máxima, chegando em um 96% de perda de pacotes. A Figura 5.21 mostra a taxa de perda estimada para cada distância.

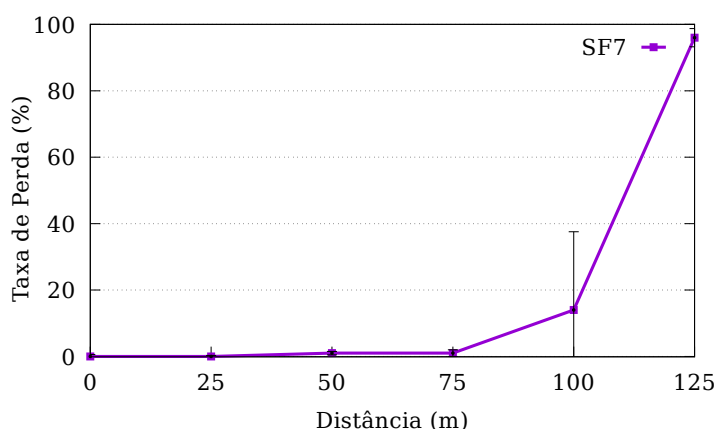


Figura 5.21: Taxa de perda em função da distância em ambiente de floresta.

5.3.2 Vazão

O tamanho máximo do quadro, para o experimento em floresta, não foi utilizado. O intuito do experimento foi avaliar o comportamento da qualidade do sinal e a potência do sinal. Contudo, a informação enviada no quadro foi avaliada, dando continuação às métricas utilizadas no presente trabalho. Assim, o tamanho do quadro foi de 51 bytes. Entre 0m e 75m a vazão se manteve estável entre 650 bit/s. Já entre 100m e 125m a vazão caiu para 200 bit/s. A Figura 5.22 mostra que o comportamento da vazão começa diminuir depois dos 75m. O resultado da vazão não é diretamente proporcional com a taxa de perda de pacotes, pois o trabalho não calcula a vazão média do enlace; a vazão calculada é instantânea.

5.3.3 Potência do Sinal

A Figura 5.23 mostra o comportamento da potência do sinal no enlace em função da distância. Devido à densa vegetação, a potência do sinal desvaneceu rapidamente. Além da vegetação, as precipitações fluviais constantes degradaram os sinais

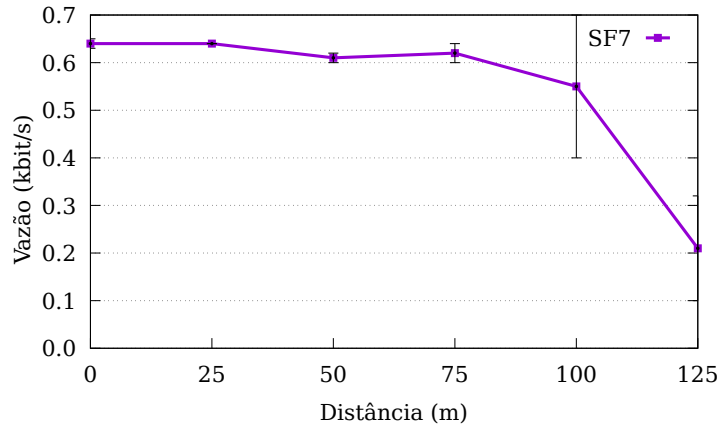


Figura 5.22: Vazão em função da distância em ambiente de floresta.

de rádio. Também deve-se destacar que a linha de visada na trilha se viu diminuída em uma distância curta ($\leq 75\text{ m}$), o que influi diretamente na propagação no ambiente de floresta. Conforme esperado, o desempenho do enlace com respeito à potência do sinal foi atenuado em uma distância curta com respeito ao máximo alcance da tecnologia; na trilha dos experimentos, a potência do sinal em 125 m foi de -126,08 dBm, sendo o nível mínimo de recepção de -148 dBm [33].

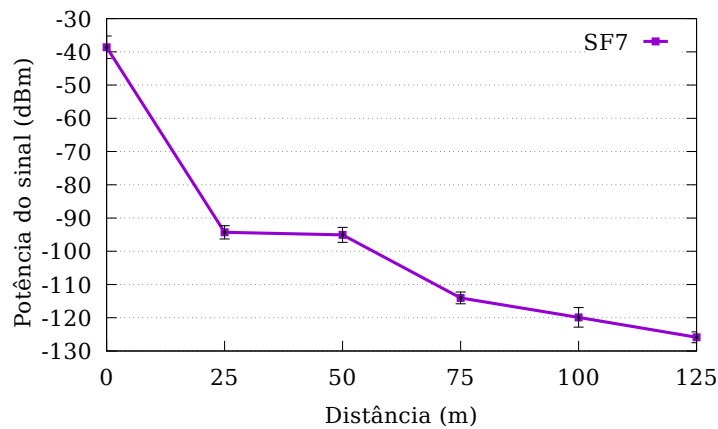


Figura 5.23: Potência do sinal em função da distância em ambiente de floresta.

5.3.4 Relação Sinal-Ruído

A perturbação do ruído produzido pelo ambiente florestal dificulta a propagação entre as unidades transmissora e receptora. Porém, no experimento foi percebida essa perturbação em $\pm 100\text{ m}$, quando se obteve uma relação sinal-ruído de aproximadamente -1 dBm. Com relação à potência do sinal, em 100 m a potência é de aproximadamente de -120 dBm, indicando que a potência do sinal desvaneceu-se de forma precipitada. A Figura 5.24 mostra o comportamento do SNR no ambiente de floresta,

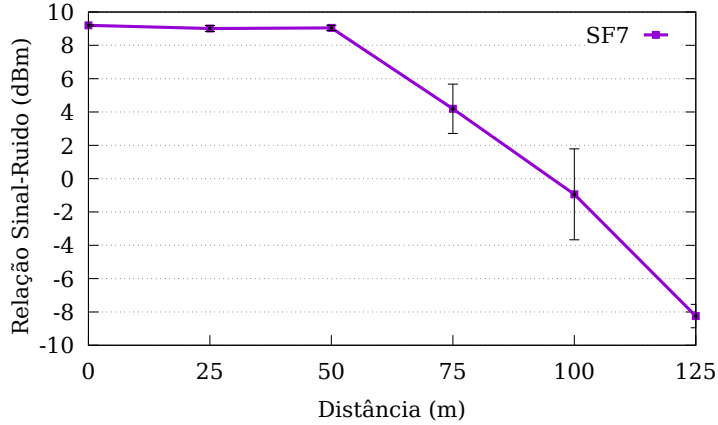


Figura 5.24: Relação Sinal-Ruído em função da distância em ambiente de floresta.

5.4 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos neste capítulo destacaram o desempenho da tecnologia LoRa. Como primeira medida, foi observado que os protótipos experimentais se desenvolveram bem nos cenários que foram implementados. Por outra parte, a troca de SF permitiu ver a variação dos pacotes, assim como o desempenho a medida que a distância aumentou, e a medida que variou a relação sinal-ruído para cada um dos cenários. Da mesma forma, também foi observado que o intervalo de tempo entre o início e o fim das transmissões foi similar para todos os experimentos em todos os cenários, o que permite intuir que a tecnologia é robusta no que faz referência à interferência e detecção do sinal por baixo do sinal do ruído; para isso, a técnica de modulação do LoRa e a sensibilidade dos dispositivos permitiu comprovar que, com sinais altamente sensíveis, os módulos receptores conseguem recuperar o sinal íntegro enviado pelo transmissor.

Um comportamento recorrente dos experimentos, foi que na proximidade dos transmissores com a vegetação densa ou com estruturas sólidas, teve maiores perdas e quedas de potência no enlace, enquanto que quando o sinal emitido pelo transmissor foi irradiado com espaço, o receptor conseguiu perceber o sinal e recuperá-lo. Foi o caso do experimento *indoor* em 80 m e 160 m com NLoS, aonde a unidade transmissora encontrou-se com maior oposição por conta da estrutura do edifício, no local escolhido para fazer as transmissões; foi notado que o comportamento dos sinais em 160 m, ainda sendo mais distantes e variaram seu SF, tiveram um melhor desempenho tanto em potência, quanto em vazão e taxa de perda. Mesmo caso foi encontrado no teste *outdoor*, aonde a medição de 1000 m apresentou diferenças significativas com respeito as outras medições, sendo este afetado pela vegetação densa do local.

A relação da vazão teórica comprada com a vazão obtida dos experimentos *outdoor* em campo aberto apresentam inconsistências que podem estar associadas ao

método de transmissão de pacotes da unidade transmissora. A biblioteca implementa um código que requer um ACK da unidade receptora, o que pode ter afetado o cálculo da vazão. Por outro lado, ainda não sendo descartada essa configuração, a vazão nos experimentos *indoor* e *outdoor* foi muito semelhante, por conta da configuração similar usada para esses dois testes. Por outra parte, foi observado que os intervalos de tempo entre o início e o fim de uma transmissão avaliados no receptor, permitem corroborar o comportamento enquanto à relação de tempo de transmissão e tamanho do pacote. Como foi avaliado, os SF menores conseguem transportar maior quantidade de dados, enquanto um SF maior toma mais tempo em terminar de enviar os pacotes. A relação do SF com o SNR é particularmente interessante porque partindo da variação do SNR para variar o SF no LoRaWAN [5, 15], se estima a qualidade do sinal para fazer taxas de dados adaptativas, e de essa forma aproveitar a ortogonalidade do sistema, e a resistência a interferência, tudo isso através da diversidade de SF. Para isso, nos experimentos realizados foi encontrado um comportamento particular já em alguns SF, por exemplo, o SF7, que não tem um padrão de variação de mais de 3 dBm, enquanto a potência do sinal se mantém por cima de -100 dBm. As Tabelas 5.1 e 5.3 mostram esse comportamento. Agora, em distâncias maiores o comportamento não muda por cima de -6 dBm, como pode se ver na Tabela 5.2. Por outra parte, como a potência do sinal tem um comportamento exponencial decrescente nos primeiros metros, e depois se estabiliza, intuir uma mudança na taxa adaptativa a partir da potência do sinal não seria o mais apropriado. Contudo, a variação do SNR tem tendência a diminuir conforme aumenta a distância e o SF.

Tabela 5.1: Relação SF com SNR e RSSI cenário *Indoor*

Cenário	Distância (m)	SF	SNR (dBm)	RSSI (dBm)
<i>Indoor</i>	0	7	$6,86 \pm 0,05$	$-40,34 \pm 0,17$
		8	$6,84 \pm 0,05$	$-37,49 \pm 0,03$
		9	$6,73 \pm 0,12$	$-37,74 \pm 0,55$
		10	$5,64 \pm 0,04$	$-37,82 \pm 0,12$
		11	$4,90 \pm 0,03$	$-37,48 \pm 0,08$
	80-3	7	$6,83 \pm 0,20$	$-71,73 \pm 0,47$
		8	$8,02 \pm 0,01$	$-67,78 \pm 0,09$
		9	$8,18 \pm 0,07$	$-73,08 \pm 0,19$
		10	$6,03 \pm 0,05$	$-65,85 \pm 0,14$
		11	$5,96 \pm 0,02$	$-69,74 \pm 0,05$
	160-3	7	$6,70 \pm 0,14$	$-76,79 \pm 0,33$
		8	$8,01 \pm 0,01$	$-73,69 \pm 0,26$
		9	$7,21 \pm 0,43$	$-77,93 \pm 0,46$
		10	$6,51 \pm 0,17$	$-82,08 \pm 0,48$
		11	$5,85 \pm 0,12$	$-74,95 \pm 0,19$
	80-2	7	$-6,19 \pm 0,24$	$-120,94 \pm 0,33$
		8	$-2,18 \pm 0,07$	$-115,10 \pm 0,09$
		9	$-4,02 \pm 0,29$	$-118,02 \pm 0,47$
		10	$-4,03 \pm 0,37$	$-117,95 \pm 0,49$
		11	$-1,54 \pm 0,70$	$-114,29 \pm 1,04$
	160-2	7	$0,00 \pm 0,05$	$-108,15 \pm 0,17$
		8	$-3,91 \pm 0,11$	$-117,65 \pm 0,18$
		9	$1,20 \pm 0,23$	$-107,48 \pm 0,20$
		10	$-5,85 \pm 0,28$	$-120,48 \pm 0,15$
		11	$-4,64 \pm 2,72$	$-118,24 \pm 3,18$
	80-1	7	$-7,65 \pm 0,18$	$-122,82 \pm 0,20$
		8	$-10,56 \pm 0,42$	$-124,94 \pm 1,73$
		9	$-11,40 \pm 0,60$	$-126,49 \pm 0,44$
		10	$-8,46 \pm 0,35$	$-123,65 \pm 0,36$
		11	$-10,90 \pm 1,26$	$-125,95 \pm 1,28$
	160-1	7	$-7,32 \pm 0,05$	$-122,43 \pm 0,06$
		8	$-6,16 \pm 0,05$	$-120,77 \pm 0,08$
		9	$-5,29 \pm 0,03$	$-119,72 \pm 0,06$
		10	$-6,98 \pm 0,04$	$-122,07 \pm 0,05$
		11	$-7,46 \pm 0,22$	$-122,47 \pm 0,21$

Tabela 5.2: Relação SF com SNR e RSSI cenário *Outdoor* - Campo aberto

Cenário	Distância (m)	SF	SNR (dBm)	RSSI (dBm)
<i>Outdoor</i> Campo Aberto	0	7	$6,21 \pm 0,16$	$-41,54 \pm 0,21$
		8	$5,75 \pm 0,21$	$-42,97 \pm 0,13$
		9	$6,87 \pm 0,45$	$-45,48 \pm 1,21$
		10	$5,18 \pm 0,23$	$-42,86 \pm 1,18$
		11	$4,75 \pm 0,24$	$-47,57 \pm 1,14$
	500	7	$-1,88 \pm 0,44$	$-112,67 \pm 0,87$
		8	$-1,24 \pm 0,47$	$-111,53 \pm 1,07$
		9	$-1,69 \pm 0,51$	$-112,25 \pm 1,25$
		10	$-3,26 \pm 1,27$	$-114,97 \pm 2,2$
		11	$-2,94 \pm 0,44$	$-114,79 \pm 0,59$
	1000	7	$-8,49 \pm 0,62$	$-122,71 \pm 0,68$
		8	$-6,8 \pm 0,45$	$-120,71 \pm 0,54$
		9	$-5,98 \pm 0,38$	$-119,83 \pm 0,49$
		10	$-7,8 \pm 0,37$	$-121,8 \pm 0,42$
		11	$-7,31 \pm 0,58$	$-120,97 \pm 0,66$
	1500	7	$-5,7 \pm 0,35$	$-118,44 \pm 0,47$
		8	$-5,63 \pm 0,44$	$-118,35 \pm 0,53$
		9	$-6,04 \pm 0,19$	$-118,9 \pm 0,3$
		10	$-5,81 \pm 0,37$	$-118,45 \pm 0,44$
		11	$-6,62 \pm 0,18$	$-119,4 \pm 0,18$
2000	7	$-8,52 \pm 0,29$	$-122,08 \pm 0,51$	
	8	$-9,32 \pm 0,41$	$-123,26 \pm 0,56$	
	9	$-10,53 \pm 0,6$	$-124,37 \pm 0,81$	
	10	$-11,16 \pm 1,02$	$-124,64 \pm 0,77$	
	11	$-14,48 \pm 0,86$	$-124,79 \pm 0,77$	

Tabela 5.3: Relação SF com SNR e RSSI cenário *Outdoor* - Floresta

Cenário	Distância (m)	SF	SNR (dBm)	RSSI (dBm)
<i>Outdoor</i> Floresta	0	7	$9,2 \pm 0,05$	$-38,62 \pm 3,39$
	25	7	$9,01 \pm 0,18$	$-94,29 \pm 2$
	50	7	$9,05 \pm 0,16$	$-95,06 \pm 2,24$
	75	7	$4,19 \pm 1,48$	$-114,04 \pm 1,77$
	100	7	$-0,94 \pm 2,73$	$-119,88 \pm 2,93$
	125	7	$-8,25 \pm 0,7$	$-125,87 \pm 1,64$

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

No paradigma da Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), objetos do cotidiano passam a ser capazes de atuar, sensorear, processar e se comunicar. Esses objetos passam a ser chamados, então, de objetos inteligentes. As redes de longo alcance e baixa potência (*Long Range Low Power WAN*) possuem grande gama de aplicações, em especial sob o ponto de vista do paradigma IoT, pois os objetos inteligentes, em geral, são restritos em termos de energia.

A tecnologia LoRa é utilizada para implementar redes LoRaWAN e tem se tornado uma opção cada vez mais adotada comercialmente. Este trabalho conduziu uma caracterização da tecnologia LoRa para redes de longo alcance e baixa potência. Essa tecnologia utiliza uma série de parâmetros para garantir a comunicação de longo alcance e baixa potência entre dispositivos, entre eles o fator de espalhamento (*Spreading Factor* - SF). O fator de espalhamento aumenta a sensibilidade do receptor, ao custo de menores taxas de transmissão. Foi construído um protótipo com dois nós capazes de trocar mensagens utilizando a tecnologia LoRa. Para isso, foram usadas placas de programação Arduino, e implementada uma biblioteca baseada no Semtech SX1276 para módulos sem-fio LoRa. Esses módulos foram complementados com outros dispositivos para a aquisição de dados de posicionamento, e variáveis ambientais, com o intuito de mostrar um sistema embarcado de baixo custo para diferentes usos. A partir do envio e recepção de mensagens realizado pelo protótipo, são obtidas medidas de taxa de perda de pacotes, potência do sinal, relação sinal-ruído e de vazão. Essas medidas são obtidas variando o SF e a distância entre os nós do protótipo. As taxas de transmissão obtidas empiricamente são, então, comparadas com as taxas de transmissão teóricas, para cada SF utilizado. Segundo nossos resultados, o melhor desempenho com relação à taxa de transmissão teórica é o do maior fator de espalhamento testado, SF11. Isso se deve ao fato de, nessa configuração, há uma menor perda de pacotes.

No cenário *indoor*, foi observado que a localização e mobilidade dos nós são importantes para manter a comunicação do enlace constante, devido a que a in-

terferência causada pela estrutura do edifício pode intervir na comunicação dos participantes da rede. Assim, foram obtidos resultados que mostram que pontos específicos de um local podem ter influência direta da estrutura principal do prédio, e que nem todos os pontos mais próximos podem garantir uma comunicação estável em comparação com outra mais distante. Por outra parte, no cenário *outdoor* em campo aberto foram atingidas distâncias maiores que nos outros dois cenários de experimentação, porém, mais sensível à interferência. No entanto, os resultados permitiram intuir que podem ser atingidas distâncias maiores para a comunicação dos nós, isso por conta dos dados de potência do fabricante, e pelo resultado dos experimentos. O cenário *outdoor* na floresta foram atingidas distâncias mínimas, porém, nas condições que foram feitos o experimentos, a localização dos equipamentos foi importante na comunicação dos enlaces. Uma antena atingindo desde uma altura maior que a dos experimentos pode ter melhores resultados; isso porque enquanto os nós estiveram em linha de visada sem interferência da vegetação, o enlace manteve uma conexão estável até cair na última distância avaliada. Não houve interferências de frequência, ou eletromagnéticas que tenham interferido direta ou indiretamente no funcionamento das unidades implementadas.

Com os resultados obtidos, observou-se a influência do SF no desempenho da tecnologia LoRa. A saber, não se tem um fator de espalhamento mais robusto que outro ou não, observa-se a degradação da comunicação quando as propriedades desse SF já não atingem a necessidade da comunicação. Cada SF é robusto enquanto a comunicação se desenvolve nas características que o cenário assim o requer. A partir da execução deste trabalho, foi submetido um artigo para a Sociedade Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos SBRC, e o cenário da floresta parte de um outro artigo de pesquisa submetido para o mesmo congresso. Seguem em [36, 37].

Como trabalhos futuros, pretende-se programar os nós do protótipo para que realizem retransmissões sempre com fatores de espalhamento de acordo com as propriedades do meio compartilhado. Assim, as retransmissões possuem uma chance maior de sucesso. Isto com o objetivo de poder gerar a ortogonalidade e diversidade do SF na rede. Assim, podem-se garantir mais conexões com sucesso em uma rede de baixo custo, com um sistema embarcado para IoT que possa fazer as vezes de *gateway* com funciones básicas para a rede LoRaWAN. Assim mesmo, se essa ortogonalidade pode ter inteligência para decidir a troca ou não de um SF na comunicação entre os nós, faz parte da implementação de um sistema de taxa adaptativo, com o intuito de variar o SF segundo a qualidade do sinal e os níveis de potência do enlace, propriedades atribuídas ao SNR e o RSSI. Outros trabalhos futuros passam pela implementação de *gateways* de baixo custo, baseados em uma linguagem de programação e embarcados em uma Raspberry Pi. Embora não te-

nham a mesma capacidade de um *gateway* específico, podem atingir as necessidades de inteligência que precisa a rede. Parte do desenvolvimento deste trabalho está em paralelo com a implementação de um *gateway* com os dispositivos que foram usados para os protótipos experimentais deste trabalho. Já com o intuito de atingir outras necessidades da rede, a implementação de múltiplos saltos na arquitetura da rede LoRaWAN joga um papel interessante de cara à integração de tecnologias para soluções de IoT no paradigma das Cidades Inteligentes. Os múltiplos saltos no LoRa vão fazer com que a rede perca em parte a sua característica de estrela de estrelas, porém, vai ganhar em descentralização da informação, assim como em conectividade. Em ambientes aonde a conexão se vê reduzida por conta da densidade de objetos podem interferir nas comunicações, como no caso do experimento *outdoor* na floresta, que a distância deixou de ser uma propriedade na comunicação por conta das múltiplas interferências da vegetação, o clima, densidade de nuvens, entre outras, uma solução adaptada para manter a comunicação em múltiplos saltos com o LoRa pode ajudar a cobrir espaços de difícil acesso, assim como manter comunicações paralelas entre administradores da rede.

Depois dos resultados da proposta deste trabalho, podem ser feitos mais testes para ampliar o conceito prático da tecnologia LoRa. Testes com um *gateway* se fazem necessários para entender como pode-se desenvolver toda a arquitetura da rede. Disso depende em boa parte, a implementação de um *gateway* em um sistema de baixo custo, como o Raspberry Pi. Também podem ser feitos mais testes atingindo distâncias maiores, em cenários com e sem interferência, para avaliar o alcance total da tecnologia com os dispositivos físicos disponíveis no laboratório, assim como variando a largura de banda, taxa de código, e outras propriedades do LoRa que ainda não foram testada no laboratório. Por outro lado, também podem ser feitos experimentos *indoor* para avaliar a distância máxima de alcance em um enlace, e como dito anteriormente, realizar outros testes na floresta, com o intuito de obter a melhor configuração para propor uma rede física e lógica robusta como solução para um problema específico da rede.

Referências Bibliográficas

- [1] 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>.
- [2] SCHAFFERS, H., KOMNINOS, N., PALLOT, M., et al. “Smart Cities and the Future Internet: Towards Cooperation Frameworks for Open Innovation”. In: *The Future Internet: Future Internet Assembly 2011: Achievements and Technological Promises*, pp. 431–446, Springer Berlin Heidelberg, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-20898-0_31.
- [3] LORATM-ALLIANCE. “LoRaTM-Alliance Technology”. Available online: <https://www.lora-alliance.org/technology>. Acessado em setembro de 2017.
- [4] 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.
- [5] SEMTECH CORPORATION. “LoRaTM Modulation Basics AN1200.22”. Available online: <https://www.semtech.com/uploads/documents/>, 2015.
- [6] REYNDERS, B., MEERT, W., POLLIN, S. “Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication”. In: *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, pp. 1–6, May 2016. doi: 10.1109/ICT.2016.7500415.
- [7] CENTENARO, M., VANGELISTA, L., ZANELLA, A., et al. “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios”, *IEEE Wireless Communications*, v. 23, n. 5, pp. 60–67, October 2016.
- [8] GOURSAUD, C., GORCE, J.-M. “Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges”, *EAI endorsed transactions on Internet of Things*, out. 2015. doi: 10.4108/eai.26-10-2015.150597.

- [9] SORNIN, N., CHAMPION, L. “Signal concentrator device”. Available online: <https://patents.google.com/patent/US20160020932>, July 2014.
- [10] PETÄJÄJÄRVI, J., MIKHAYLOV, K., PETTISSALO, M., et al. “Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 13, n. 3, pp. 1–16, 2017. doi: 10.1177/1550147717699412.
- [11] NEUMANN, P., MONTAVONT, J., NOËL, T. “Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study”. In: *IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 1–8, out. 2016.
- [12] PETÄJÄJÄRVI, J., MIKHAYLOV, K., ROIVAINEN, A., et al. “On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology”. In: *14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp. 55–59, dez. 2015.
- [13] BAHARUDIN, A. M., YAN, W. “Long-range wireless sensor networks for geolocation tracking: Design and evaluation”. In: *2016 International Electronics Symposium (IES)*, pp. 76–80, set. 2016. doi: 10.1109/ELECSYM.2016.7860979.
- [14] SONG, Q., NUAYMI, L., LAGRANGE, X. “Survey of radio resource management issues and proposals for energy-efficient cellular networks that will cover billions of machines”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2016, n. 1, pp. 140, Jun 2016.
- [15] LORATM-ALLIANCE. “LoRaWAN Specification V1.0.2”. Available online: <https://www.lora-alliance.org/>, 2016.
- [16] BANKOV, D., KHOROV, E., LYAKHOV, A. “On the Limits of LoRaWAN Channel Access”. In: *International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, pp. 10–14, Nov 2016. doi: 10.1109/EnT.2016.011.
- [17] 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.
- [18] SANTOS, B. P., SILVA, L. A. M., CELES, C. S. F. S., et al. “Internet das Coisas: da Teoria à Prática”. In: *Livro de Minicursos SBRC'2016*, pp. 1–50, Salvador, Bahia, 2016.

- [19] AUGUSTIN, A., YI, J., CLAUSEN, T., et al. “A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of things”, *Sensors*, v. 16, n. 9, pp. 1466, 2016.
- [20] BOR, M. C., ROEDIG, U., VOIGT, T., et al. “Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?” In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, MSWiM '16, pp. 59–67, New York, NY, USA, 2016. ACM. doi: 10.1145/2988287.2989163.
- [21] SEMTECH CORPORATION. “LoRa™ Modem Designer’s Guide”. Available online: <https://www.semtech.com/uploads/documents/>, 7 2013.
- [22] MIKHAYLOV, K., PETÄJÄJÄRVI, J., HAENNINEN, T. “Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology”. In: *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, pp. 1–6, May 2016.
- [23] PETÄJÄJÄRVI, J., MIKHAYLOV, K., HÄMÄLÄINEN, M., et al. “Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring”. In: *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp. 1–5, March 2016. doi: 10.1109/ISMICT.2016.7498898.
- [24] WIXTED, A. J., KINNAIRD, P., LARIJANI, H., et al. “Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks”. In: *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1–3, Oct 2016.
- [25] MARGELIS, G., PIECHOCKI, R., KALESHI, D., et al. “Low Throughput Networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations”. In: *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp. 181–186, Dec 2015.
- [26] RAY, P. “A survey on Internet of Things architectures”, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2016. ISSN: 1319-1578. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2016.10.003>.
- [27] ADELANTADO, F., VILAJOSANA, X., TUSET-PEIRÓ, P., et al. “Understanding the limits of LoRaWAN”, *CoRR*, v. abs/1607.08011, 2016.
- [28] LATRÉ, S., LEROUX, P., COENEN, T., et al. “City of things: An integrated and multi-technology testbed for IoT smart city experiments”. In: *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pp. 1–8, Sept 2016.

- [29] TOLDOV, V., MEIJERS, J., IGUAL-PÉREZ, R., et al. “Performance evaluation of LoRa radio solution for PREDNET wildlife animal tracking project”. In: *LPWAN 2016*, Paris Roissy, France, maio 2016.
- [30] KIM, D. H., LIM, J. Y., KIM, J. D. “Low-Power, Long-Range, High-Data Transmission Using Wi-Fi and LoRa”. In: *2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS)*, pp. 1–3, set. 2016. doi: 10.1109/ICITCS.2016.7740351.
- [31] PETRIĆ, T., GOESSENS, M., NUAYMI, L., et al. “Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN”. In: *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, Sept 2016.
- [32] DE TELECOMUNICAÇÕES, A. N. “Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil”. <http://www.anatel.gov.br/institucional/acervo-documental>, 2016. Acessado em dezembro de 2017.
- [33] DRAGINO. “LoRa Shield”. Available online: http://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora_Shield. Acessado em junho de 2017.
- [34] ARDUINO. “SPI library”. <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>. Acessado em setembro de 2017.
- [35] GOOGLE. “Google Maps”. <https://maps.google.com.br/>. Acessado em setembro de 2017.
- [36] ORTIZ, F. M., CRUZ, P., DE S. COUTO, R., et al. “Caracterização de uma Rede Sem-fio de Baixa Potência e Longo Alcance para Internet das Coisas”. In: *Submetido em XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores SBRC'2018*, 2018.
- [37] DE QUEIROZ, G. F. C., FERREIRA, A. E., ORTIZ, F. M., et al. “Posicionamento de Pontos de Acesso Sem-fio para Segurança de Visitantes em Parques Florestais”. In: *Submetido em XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores SBRC'2018*, 2018.