

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Plataforma de Teste de *Gateway* LoRa para
IoT baseada em SDR



João Paulo Silvino Belo da Silva

João Pessoa

2023

João Paulo Silvino Belo da Silva

**PLATAFORMA DE TESTE DE *GATEWAY* LORA PARA IOT BASEADA
EM SDR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal da Paraíba - UFPB como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cleonilson Protásio de Souza

João Pessoa

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586p Silva, João Paulo Silvino Belo da.

Plataforma de teste de Gateway Lora para IoT baseada
em SDR / João Paulo Silvino Belo da Silva. - João
Pessoa, 2023.

82 f. : il.

Orientação: Cleonilson Protásio de Souza.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Internet das coisas. 2. Rádio definido por
software. 3. Gateway Lorawan. I. Souza, Cleonilson
Protásio de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 004.738.5(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

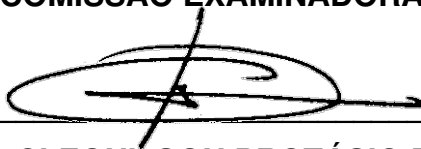
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

PLATAFORMA DE TESTE DE GATEWAY LORA PARA IOT BASEADA EM SDR

Elaborada por
JOÃO PAULO SILVINO BELO DA SILVA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA



PROF. DR. CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA
Orientador – UFPB



PROF. DR. WASLON TERLLIZZIE ARAUJO LOPES
Examinador Interno – UFPB



PROF. DR. ALISSON VASCONCELOS DE BRITO
Examinador Externo – UFPB

*Dedico este trabalho à minha filha, Chiara Luce,
que tanto me ensinou sobre a vida,
em tão pouco tempo de existência neste mundo,
sem dizer qualquer palavra.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus. Pois, sem Ele, nada conseguiria. Muitos dons foram recebidos para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha esposa, que esteve ao meu lado em todos os momentos, me apoiando. Ela me encorajou quando os obstáculos foram muito grandes. Agradeço também, aos meus pais e à minha irmã pelas profundas orações e palavras carinhosas que sempre me animaram.

Agradeço ao meu orientador, professor Protásio, que não exitou em me guiar para elaboração de um trabalho relevante. Sua dedicação à pesquisa e atenção no exercício de orientação foram fundamentais.

Agradeço à banca pela disponibilização de tempo e atenção para avaliar o trabalho. E, certamente, contribuiu bastante para enriquecê-lo.

Agradeço aos amigos e familiares que, de diversas formas, contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído com êxito.

RESUMO

Atualmente, a presença massiva de dispositivos inteligentes conectados à internet é uma realidade. Desde o início do corrente século, quando surgiu a Internet das Coisas (IoT), diferentes tecnologias de transmissão e gerenciamento de dados têm sido desenvolvidas e aperfeiçoadas, a fim de prover soluções mais eficientes para os variados campos de aplicação. Esse contexto favoreceu a utilização das Redes de Longo Alcance e Baixa Potência (*Low-Power Wide-Area Network* - LPWAN), pois a categoria reúne padrões de rede sem fio caracterizados pela transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, características importantes da IoT. Destaca-se nas opções em LPWAN, o protocolo LoRaWAN, que possui estrutura flexível, permitindo ao usuário construir e parametrizar sua rede de forma independente ou utilizar um serviço de computação em nuvem, que pode ser público ou privado. Além disso, apresenta considerável aceitação e utilização, propiciando ampla variedade de equipamentos no mercado. Neste trabalho, foi desenvolvido um ambiente de testes para avaliar o desempenho de diferentes modelos de *gateways* LoRaWAN, dispositivos fundamentais nesse tipo de rede, que operam transferindo dados enviados pelos dispositivos finais (nós) para um servidor em nuvem, bem como atuam no sentido inverso. Considerando a existência de diversas formas de interferência na comunicação entre os dispositivos finais e os *gateways* em redes LoRaWAN comerciais, foi implementada uma plataforma constituída de dispositivos finais emulados, a partir da qual é possível transmitir sinais em conformidade com as especificações do protocolo LoRaWAN por meio de um rádio definido por software (SDR). O ajuste de parâmetros de envio de dados e a adição de ruído aos sinais transmitidos pelos dispositivos finais emulados propiciou a criação de cenários que simulam as características e interferências possíveis em uma rede LoRaWAN. O desempenho dos *gateways* sob teste foi verificado a partir da análise da capacidade de recepção de sinais transmitidos e com base nas especificações técnicas do protocolo. Dessa forma, o principal critério adotado na análise foi a taxa de pacotes entregues (*Packet Delivery Rate* - PDR). Por meio dos resultados experimentais, foi possível estabelecer o melhor *gateway* considerando os estímulos de testes aplicados.

Palavras-chave: Internet das Coisas, Rádio definido por software, teste de *Gateway* LoRaWAN.

ABSTRACT

Currently, the massive presence of smart devices connected to the internet is a reality. Since the beginning of the current century, when the Internet of Things (IoT) emerged, different data transmission and management technologies have been developed and improved, in order to provide more efficient solutions for the various fields of application. This context allowed the use of LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). This wireless network type is characterized by the data transmission over long distances with low energy consumption, important characteristics of IoT. In this group, the LoRaWAN protocol stands out, which has a flexible structure, allowing the user to independently build and parameterize their network or use a cloud computing service, which can be public or private. In addition, it has considerable acceptance and use, motivating a wide variety of equipment on the global market. In this work, it was sought to develop a tests platform to evaluate the performance of different models of LoRaWAN gateways, a fundamental device in this type of network, which operates by transferring the information sent by the end devices (nodes) to a cloud server, as well as acting in the opposite direction. Considering the different types of interference in communication between end devices and gateways in commercial LoRaWAN networks, it was implemented a platform composed of an emulated end devices. Therefore, it is possible to transmit specifications LoRaWAN compatible signals, by a software defined radio (SDR). The transmission parameters settings and adding noise to signals transmitted by emulated end devices allowed the creation of scenarios that simulate the characteristics and possible interferences on a LoRaWAN network. The performance of the devices was established from the analysis of the reception capacity of signals transmitted through a software-defined radio (SDR), and based on the technical specifications of the protocol. Experimental results show the best gateway considering the applied test stimulus.

Keywords: Internet of Things, Software-Defined Radio, LoRaWAN Gateway test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do conceito de coisa conforme o padrão IEEE Std 2413-2019.	21
Figura 2 – Modelo conceitual de framework arquitetural da IEEE Std 2413-2019.	22
Figura 3 – Interação entre sub-modelos do padrão IoT-A.	24
Figura 4 – Modelo de arquitetura <i>three-tier</i> do padrão IIRA.	25
Figura 5 – Diagrama de classificação das principais redes aplicadas à IoT.	25
Figura 6 – Forma de onda de um <i>up-chirp</i>	29
Figura 7 – <i>Up-chirp</i> e <i>down-chirp</i> representados através de espectrograma.	30
Figura 8 – Representação de um <i>frame</i> de sinal LoRa por meio de espectrograma.	30
Figura 9 – Representação do modelo ISO/OSI e das camadas de rede LoRaWAN.	31
Figura 10 – Arquitetura de rede LoRaWAN.	32
Figura 11 – Estrutura de pacotes no protocolo LoRaWAN.	35
Figura 12 – Ilustração do espectrograma de frequência de um sinal LoRa gerado a partir de um transmissor RN2483.	37
Figura 13 – Arquitetura de rede LoRaWAN baseada em <i>ChirpStack</i>	38
Figura 14 – Imagem de <i>gateway</i> LoRaWAN baseado em RAK2287.	39
Figura 15 – Diagrama de blocos do <i>chip</i> SX1302.	40
Figura 16 – Diagrama de blocos do <i>chip</i> SX1250.	41
Figura 17 – <i>Gateway</i> industrial RisingHF RHF2S008.	41
Figura 18 – Modelo do LabView destinado ao monitoramento espectral de sinais.	44
Figura 19 – Modelo do LabView para gráfico de constelação.	44
Figura 20 – Placa de desenvolvimento Feather M0.	45
Figura 21 – Placa de desenvolvimento baseada em MEGA328P.	45
Figura 22 – Sinal experimental LoRa em gráfico de constelação.	46
Figura 23 – Gráfico de sinal experimental LoRa no domínio da frequência.	47
Figura 24 – Espectrograma de frequência de sinal experimental LoRa.	47
Figura 25 – Gráfico de sinal experimental LoRa no domínio do tempo obtido através do LabView.	47
Figura 26 – Gráfico de sinal experimental LoRa no domínio do tempo obtido através do Matlab.	48
Figura 27 – Esquema da plataforma de teste de <i>gateway</i> LoRaWAN.	49
Figura 28 – Esquema do Emulador de dispositivos finais LoRaWAN.	50
Figura 29 – Interface do programa Gerador de pacotes LoRaWAN.	51
Figura 30 – Estrutura em cadeia de codificação e modulação da camada física LoRaPHY.	53
Figura 31 – Aplicação de aquisição de dados baseada em protocolo MQTT e desenvolvida em Node-RED.	55

Figura 32 – Estrutura detalhada da plataforma de teste de <i>gateway</i> LoRaWAN. . .	56
Figura 33 – Ciclo de operação do Emulador de dispositivos finais para realização de testes.	56
Figura 34 – Disposição física dos equipamentos durante realização de testes. . . .	57
Figura 35 – Gráfico de sinal no domínio do tempo gerado pelo SDR.	59
Figura 36 – Gráfico de sinal com ruído no domínio do tempo gerado pelo SDR ($SNR_o = 10\text{dB}$).	60
Figura 37 – Gráfico de sinal gerado pelo SDR USRP-2922.	64
Figura 38 – Gráfico de sinal gerado pela Feather M0.	66
Figura 39 – Relação entre SNR_o e PDR	67
Figura 40 – Relação entre SNR_o e PDR para diversos valores de SF:	68
Figura 41 – Relação entre ganho de potência do sinal com ruído e PDR ($SNR_o = 3\text{ dB}$).	69
Figura 42 – Pacotes recebidos pelos <i>gateways</i> RAK2287 e RHF2s008, respectivamente, sem interferência provocada.	69
Figura 43 – Pacotes recebidos pelos <i>gateways</i> RAK2287 e RHF2s008, respectivamente. Experimento realizado com interferência provocada por sinal LoRa de diferente frequência.	70
Figura 44 – Pacotes recebidos pelos <i>gateways</i> RAK2287 e RHF2s008, respectivamente. Experimento realizado com interferência provocada por dispositivos transmitindo sinais LoRa em vários canais.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros aplicados em teste de sensibilidade ao ruído.	59
Tabela 2 – Valores mínimos de SNR para cada valor de SF, referentes ao transceptor LoRa SX1276.	60
Tabela 3 – Parâmetros aplicados em teste de sensibilidade ao ruído com variação de SF.	61
Tabela 4 – Parâmetros aplicados em teste de resposta ao ganho de potência do sinal.	61
Tabela 5 – Parâmetros aplicados em teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal.	62
Tabela 6 – Parâmetros aplicados em teste de interferência provocada por sinal em diferente canal.	62
Tabela 7 – Parâmetros aplicados em teste de interferência por colisão em vários canais.	63
Tabela 8 – Valores de RSSI e SNR médios medidos pelos <i>gateways</i> RAK2287 e RHF2s008; e taxa de pacotes entregues para diferentes valores de ganho aplicado ao sinal.	67
Tabela 9 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 916,8 MHz	80
Tabela 10 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917 MHz	80
Tabela 11 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,2 MHz	80
Tabela 12 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,4 MHz	81
Tabela 13 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,6 MHz	81
Tabela 14 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,8 MHz	81
Tabela 15 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 918 MHz	81
Tabela 16 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 918,2 MHz	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABP	<i>Activation by Personalization (Ativação por Personalização)</i>
ADC	<i>Analogic-to-digital Converter (Conversor Analógico-digital)</i>
ADR	<i>Adaptative Data Rate (Taxa de Dados Adaptativa)</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
BW	<i>Bandwidth (Largura de Banda)</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy (Bluetooth de Baixa Energia)</i>
Chirp	<i>Compressed High Intensity Radar Pulse (Pulso de Radar de Alta Intensidade Comprimido)</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum (Espalhamento em Espectro Chirp)</i>
DAC	<i>Digital-to-analogic Converter (Conversor Digital-analógico)</i>
DR	<i>Data Rate (Taxa de Dados)</i>
CR	<i>Code Rate (Taxa de Código)</i>
FEC	<i>Forward Error Correction (Correção Direta de Erros)</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)</i>
IIC	<i>Industrial Internet Consortium (Consórcio de Internet Industrial)</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things (Internet das Coisas Industriais)</i>
IIRA	<i>Industrial Internet Reference Architecture (Arquitetura de Referência de Internet Industrial)</i>
IoT	<i>Internet of Things (Internet das Coisas)</i>
IoT-A	<i>Internet of Things - Architecture (Internet das Coisas - Arquitetura)</i>
IoT ARM	<i>Internet of Things Architecture Reference Model (Modelo de Arquitetura de Referência para Internet das Coisas)</i>
LAN	<i>Local Area Network (Rede local)</i>
LNS	<i>LoRaWAN Network Server (Servidor de Rede LoRaWAN)</i>

LoRa	<i>Long Range (Longo Alcance)</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network (Rede Geograficamente Distribuída de Longo Alcance)</i>
LPSAN	<i>Low Power Short Area Network (Rede de Curto Alcance e Baixa Potência)</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network (Rede de Longo Alcance e Baixa Potência)</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution (Evolução de Longo Prazo - Comunicação do Tipo Máquina)</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network (Rede Metropolitana)</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport (Transporte Telemétrico de Mensagens Enfileiradas)</i>
NB-IoT	<i>Narrowband Internet of Things (Banda Estreita para Internet das Coisas)</i>
NFC	<i>Near Field Communication (Comunicação por Campo de Proximidade)</i>
OTAA	<i>Over-the-air activation (Ativação no Ar)</i>
PAN	<i>Personal Area Network (Rede pessoal)</i>
PDR	<i>Packet Delivery Ratio (Taxa de Pacotes Entregues)</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification (Identificação por Radiofrequência)</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido)</i>
SDR	<i>Software-defined radio (Rádio Definido por Software)</i>
SF	<i>Spreading factor (Fator de Espalhamento)</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio (Relação Sinal-ruído)</i>
ToA	<i>Time on Air (Tempo no Ar)</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
WAN	<i>Wide Area Network (Rede Geograficamente Distribuída)</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network (Rede Pessoal Sem Fio)</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks (Redes de Sensores Sem Fio)</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	TRABALHOS RELACIONADOS	16
1.3	CONTRIBUIÇÕES	18
1.4	OBJETIVOS	18
1.4.1	Objetivo Geral	18
1.4.2	Objetivos Específicos	18
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	19
2	ARQUITETURAS E TECNOLOGIAS DE INTERNET DA COISAS	20
2.1	ARQUITETURAS DE REFERÊNCIA DE INTERNET DAS COISAS .	20
2.1.1	Padrão IEEE Std 2413-2019	20
2.1.2	Padrão IoT-A	23
2.1.3	Padrão IIRA	23
2.2	TECNOLOGIAS DE REDES APLICADAS À INTERNET DAS COISAS	24
2.2.1	LPSAN	25
2.2.2	LPWAN	26
3	LORAWAN	28
3.1	CAMADA FÍSICA (LORAPHY)	28
3.2	ESPECIFICAÇÕES DA TECNOLOGIA LORAWAN	30
3.3	FORMATO DE MENSAGENS NO PROTOCOLO LORAWAN	34
3.4	PLATAFORMAS DE SERVIDOR LORAWAN	37
3.4.1	<i>ChirpStack</i>	37
3.4.2	<i>The Things Network</i>	38
3.5	GATEWAYS LORAWAN	38
4	METODOLOGIA	42
4.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO	42
4.1.1	Rádio Definido por Software	42
4.1.2	Programa computacional	43
4.1.3	Dispositivos utilizados e compatíveis com LoRaWAN	45
4.2	ANÁLISE DE SINAIS LORA	46
4.3	DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA DE TESTE DE <i>GATEWAY</i> LO- RAWAN PROPOSTA	48
4.3.1	Emulador de dispositivos finais (<i>end devices</i>)	50
4.3.2	Coleta e Análise de Pacotes	53

4.3.3	Estrutura da plataforma de teste de <i>gateways</i> LoRaWAN proposta	54
4.4	DESCRIÇÃO DOS TESTES PARAMÉTRICOS	57
4.4.1	Análise do sinal gerado pelo Emulador de dispositivos finais . .	58
4.4.2	Teste de sensibilidade ao ruído	58
4.4.3	Teste de sensibilidade ao ruído com diferentes valores de SF . .	59
4.4.4	Teste de resposta ao ganho de potência do sinal	60
4.5	DESCRIÇÃO DOS TESTES FUNCIONAIS	61
4.5.1	Teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal . .	61
4.5.2	Teste de interferência provocada por sinal em diferente canal .	62
4.5.3	Teste de interferência por colisão em vários canais	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	TESTES PARAMÉTRICOS	64
5.1.1	Análise do sinal gerado pelo Emulador de dispositivos finais . .	64
5.1.2	Teste de sensibilidade ao ruído	65
5.1.3	Teste de sensibilidade ao ruído com diferentes valores de SF . .	65
5.1.4	Teste de resposta ao ganho de potência do sinal	66
5.2	TESTES FUNCIONAIS	69
5.2.1	Teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal . .	69
5.2.2	Teste de interferência provocada por sinal em diferente canal .	70
5.2.3	Teste de interferência por colisão em vários canais	70
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.1	TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PELO SDR COM UTILIZAÇÃO DO MATLAB.	79
APÊNDICE B – RELAÇÃO ENTRE SNR_0 E $PDR(\%)$ PARA DIVERSOS VALORES DE FREQUÊNCIA	80

1 INTRODUÇÃO

O considerável número de dispositivos embarcados conectados à internet impulsionou o desenvolvimento de um novo paradigma, criado por volta de 2008, que foi denominado *Internet of Things* (IoT), e em tradução para o português significa Internet das Coisas. Porém, o registro mais antigo desse termo foi feito em 1999, com sentido diferente do utilizado no presente (ASHTON, 2009). O contexto inicial referia-se à uma proposta para aplicação industrial da tecnologia de Identificação por Radiofrequência (RFID, *Radio Frequency Identification*).

A definição da Internet das Coisas sofreu algumas adaptações, desde sua origem. A consistente troca de informações com o mundo físico, inerente à IoT, é indispensável para monitoramento, controle e melhoria de muitos processos produtivos e naturais. Assim, Minerva, Biru e Rotondi (2015) definiram IoT como “uma rede de itens embarcados e com sensores conectados à internet”. Entretanto, a simples comunicação entre sistemas embarcados através da internet não determina com rigor a Internet das Coisas, que está vinculada à forma como ocorre a interação entre o objetos do cotidiano, denominados “coisas”, e suas características. O *Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE* (2020), por exemplo, definiu IoT como “Um sistema de entidades (incluindo dispositivos físico-cibernéticos, pesquisas de dados e pessoas) que trocam informações e interagem com o mundo físico”. E ainda, acrescenta uma definição precisa da “coisa”, apresentada como “um componente ou sistema que possui funções, propriedades e meios de comunicação”.

A expansão da Internet das Coisas é evidenciada através do intenso crescimento no número de dispositivos conectados. De acordo com Hasan (2022), a taxa de crescimento anual composta entre 2015 e 2020 foi de 26%. A mesma fonte afirma que em 2021 havia 12,2 bilhões de coisas interconectadas, com estimativa de aumento para 27 bilhões, em 2030. Enquanto, de acordo com Vailshery (2022), a previsão é de 29,4 bilhões de dispositivos em 2030. Com isso, a indústria de Internet das Coisas obtém destaque, e fundamenta a importância da análise de desempenho da sua infraestrutura de rede.

Nos campos de estudo e desenvolvimento de tecnologias de redes sem fio, o *Software-Defined Radio* (SDR), rádio definido por software, em tradução para a língua portuguesa, apresenta relevante destaque. O equipamento proporciona a transmissão e recepção de sinais de radiofrequência com diferentes tipos de modulações, de forma controlada por software. Assim, o SDR é bastante utilizado para análise e desenvolvimento de aplicações relacionadas à Internet das Coisas, e constitui uma importante ferramenta para a análise de redes sem fio (AKEELA; DEZFOULI, 2018). Através da utilização do SDR, é possível transmitir sinais de rádio com características e especificações desejadas, além de ser possível acrescentar sinais de interferências e ruídos do ambiente (BOSE, 1999).

1.1 MOTIVAÇÃO

São diversos os desafios relacionados ao uso da tecnologia LoRaWAN, de acordo com cada campo de aplicação. Um exemplo de dificuldade é observado nas situações em que o consumo de energia é um fator extremamente crítico, pois a suscetibilidade à perda de pacotes devido a ruído e interferência externos implica em um necessário aumento de consumo de energia dos dispositivos finais, para garantir a transmissão dos dados (AZARI; MASOUDI, 2021). O monitoramento ambiental e agricultura inteligente são exemplos de aplicações em que o consumo de energia é um fator relevante, devido à instalação remota dos dispositivos (SWAIN et al., 2021). Os sistemas de medição inteligentes, onde também é amplamente utilizada a tecnologia LoRaWAN, possuem por características elevadas latência e densidade de nós, sobretudo quando se trata de medição de energia elétrica e consumo de gás, podendo chegar a centenas de milhares de dispositivos por ponto de acesso (RIZZI et al., 2017). Nessa situação, o grande número de dispositivos pode ocasionar a perda de pacotes, devido à colisão de dados. Petajajarvi et al. (2016) realizaram um estudo experimental em ambiente interno para avaliar a capacidade de uma rede LoRaWAN para aplicações de cuidados com a saúde e bem-estar de pessoas. Os resultados indicaram que a tecnologia é atrativa para uso nesse campo, entretanto, foi identificada maior perda de pacotes em alguns ambientes onde foram realizados os testes, devido à dificuldade de propagação de sinal nesses locais. Todos esses problemas podem ser minimizados com a configuração adequada dos equipamentos da rede. Além disso, o emprego de dispositivos eficientes é um significativo aspecto para o bom desempenho da rede.

Em redes LoRaWAN, um elemento fundamental é o *gateway*. Este equipamento promove o encaminhamento de pacotes de dados entre os dispositivos finais (*end devices*) e o servidor LoRaWAN, e pode ocorrer em ambos os sentidos, entretanto, na maior partes das vezes os dados são enviados pelos dispositivos finais, que podem ser nós sensores, por exemplo, para o servidor. A comunicação entre o *gateway* e os dispositivos finais ocorre por meio de sinais de rádio com modulação LoRa (SILVA et al., 2017). Assim, as características construtivas dos *gateways* e as condições do ambiente onde estão instalados podem interferir na adequada e eficiente comunicação com os dispositivos finais, sobretudo, em relação à capacidade de recepção de sinais de rádio, pois estão sujeitos a tipos diversos de interferência (EL-AASSER et al., 2021). Diante dos variados fabricantes de *gateways* LoRaWAN, uma ferramenta para a realização de testes e análise de desempenho desses equipamentos tem grande aplicabilidade, pois um *gateway* de baixa qualidade pode comprometer toda a rede (AFTAB; ZAIDI; MCLERNON, 2020).

Para a avaliação de *gateways*, além da necessária padronização dos procedimentos e materiais, no sentido de garantir a qualidade dos resultados, também é importante a versatilidade na realização dos ensaios. O fornecimento de estímulos variados proporciona a análise da resposta do *gateway* em condições diversas, que podem ocorrer em situações

reais. Os diferentes cenários relacionados às características do sinal, como a potência, o nível de ruído e a frequência, podem ser implementados de forma padronizada com a utilização de um SDR. A realização de testes, se feita com transmissores de rádio dedicados (sistemas embarcados com transmissores LoRa baseado em circuitos de prateleira), não garantiria a uniformidade na avaliação, pois os dispositivos não possuem a robustez e a repetibilidade que são obtidas com a utilização do SDR. Além disso, nessa situação, as configurações possíveis dos parâmetros dos sinais são bem restritos, quando se compara com a ampla variação de parâmetros proporcionada pelo Rádio Definido por *Software* (BOSE, 1999).

Dessa forma, é apresentada nesta dissertação uma plataforma de teste de *gateways* para rede LoRaWAN, a fim de avaliar a capacidade e a qualidade de recepção de sinais desses dispositivos por meio de SDR, o qual é aplicado na geração de estímulos de testes variados. O Rádio Definido por *Software* foi utilizado para emular dispositivos finais, através da transmissão de sinais LoRa em conformidade com o padrão LoRaWAN e, dessa forma, podem ser recebidos no servidor da rede. Para gerar sinais, considerando os diferentes cenários em que pode se situar um *gateway* em operação normal, foram alterados importantes parâmetros da tecnologia LoRaWAN relacionados à transmissão do sinal: fator de espalhamento, nível de ruído e potência do sinal. Além disso, outras configurações do padrão também foram consideradas na realização dos experimentos. Com isso, foi possível avaliar o desempenho dos equipamentos sob teste. A principal métrica de avaliação aplicada foi a taxa de pacotes recebidos.

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

El-Aasser et al. (2021) propõem um modelo de plataforma de simulação para as camadas em nível de bits e de pacotes em uma rede LoRaWAN. De acordo com El-Aasser et al. (2021), devido à utilização de sinais de radiofrequência em banda não licenciada pelas redes LoRaWAN, a transmissão de dados entre os dispositivos pode ser substancialmente prejudicada por outros sinais. Assim, o modelo proposto busca analisar o desempenho da rede, com base nos sinais de interferência; e busca apresentar uma solução que permita prevê as capacidades de uma rede em ambiente simulado. O experimento consistiu na implementação de algoritmos que simulam as camadas física e de rede no padrão LoRaWAN, considerando a ocorrência de sinais de interferência e ruído. Assim, foi possível estabelecer a taxa de erro de bits, que corresponde à razão entre dados recebidos e enviados, de acordo com a variação de níveis de interferência e ruído.

Loubany, Lahoud e Chall (2020) apresentam um algoritmo de otimização de parâmetros de redes LoRaWAN, em tempo real, com elevada densidade de *gateways* e dispositivos finais. De acordo com exposto no trabalho, as especificações de protocolo LoRaWAN apresentam um mecanismo que controla os parâmetros de transmissão de

sinais, visando promover um adequado gerenciamento de energia dos dispositivos finais para aumento de ciclo de vida das baterias e otimização da capacidade da rede. A solução busca ser uma alternativa para melhorar o desempenho das redes LoRaWAN, com novos modelos de ajuste adaptativo.

Croce et al. (2018) promoveram estudos especificamente na camada física do padrão LoRaWAN. Isto é, foram avaliadas as características relacionadas à transmissão de dados via sinais de rádio com modulação Lora. O trabalho refere-se ao protocolo de camada física como LoRaPHY. O *Spreading Factor* (SF), ou Fator de Espalhamento, em tradução para a língua portuguesa, corresponde a uma importante característica dessa técnica de modulação. A análise apresentada consistiu em verificar a ortogonalidade entre diferentes valores de SF utilizados pelo protocolo. Essa propriedade influencia na capacidade da rede, pois permite que a comunicação não seja afetada pela colisão de sinais. Os resultados mostraram que a ortogonalidade entre diferentes valores de SF é imperfeita, comprometendo a comunicação. Além disso, foram apresentados resultados experimentais realizados com a utilização de SDR, que indicaram a diferença de valor de potência entre os sinais necessária para possibilitar a comunicação.

Petrariu, Lavric e Coca (2019) promoveram o desenvolvimento e avaliação de um *gateway* de baixo custo. Para validar a capacidade do dispositivo, foi realizada a análise do seu desempenho em diferentes cenários, em ambiente real. A taxa de erro de pacotes (*Packet Error Rate* - PER) foi o principal parâmetro utilizado como métrica para estabelecimento do seu desempenho, considerando as variadas distâncias entre os dispositivos finais e o *gateway*.

Ruotsalainen et al. (2022) desenvolveram estudos que abordaram a vulnerabilidade à ataques sobre a camada física da rede LoRaWAN. O trabalho apresenta discussão sobre variados fatores relacionados à vulnerabilidade da rede, que podem afetar a disponibilidade, a integridade e a confiabilidade do sistema.

Marquet, Montavont e Papadopoulos (2020) analisaram as técnicas utilizadas para a transmissão de dados com a modulação LoRa, sob a perspectiva da aplicação de engenharia reversa sobre os transceptores LoRa. O estudos envolvem os processos de codificação, branqueamento, entrelaçamento e modulação dos sinais.

Ressalta-se, portanto, que os trabalhos produzidos, relacionados à utilização de SDR para transmissão de sinais LoRa, apresentam estudos e sistemas direcionados para avaliação de aspectos específicos da modulação LoRa, ou do protocolo LoRaWAN. Nesta dissertação, é proposta uma plataforma que possibilita a análise comparativa de diferentes modelos do equipamento com operação em situações diversas, a partir da emulação real de dispositivos finais de uma rede LoRaWAN por meio de programas computacionais integrados a um Rádio Definido por *Software*.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho visou contribuir, principalmente, com uma abrangente solução para realização de testes funcionais de *gateways* LoRaWAN, a partir da emulação de dispositivos finais, com ampla possibilidade de variação de configuração de transmissão, de acordo com as especificações do protocolo LoRaWAN. A plataforma deve auxiliar, de forma objetiva, no processo de escolha do modelo de *gateway* mais eficiente antes da implantação de uma rede LoRaWAN. Além disso, também busca fornecer uma solução ágil, que permita avaliar a mais adequada parametrização de equipamentos em uma rede LoRaWAN, sobretudo dos dispositivos finais. A plataforma também deve proporcionar a realização de estudos comparativos entre modelos de *gateways*, e em ambientes distintos, considerando as particularidades de cada aplicação.

Os resultados e análises, decorrentes da implementação de experimentos para avaliação de dois *gateways* LoRaWAN, expõem dados importantes sobre a capacidade de uma rede LoRaWAN, mas também explicita a diferença de desempenho funcional dos dispositivos testados.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a concepção, desenvolvimento, implementação e análise de uma plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN, por meio da emulação de dispositivos finais em diferentes condições de operação, através da geração de sinais de rádio no padrão LoRaWAN, com a utilização de um Rádio Definido por *Software*.

1.4.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos desta proposta, pode-se destacar:

- Realizar a prova de conceito de um emulador de dispositivo final LoRaWAN, baseado em SDR e *softwares*;
- Fornecer uma ferramenta para auxiliar na determinação de parâmetros ótimos de redes LoRaWAN em diferentes aplicações;
- Estabelecer procedimentos para avaliação e diagnóstico de diferentes modelos de *gateways* LoRaWAN em redes na fase de projeto ou em pleno funcionamento;
- Validar empiricamente as limitações da tecnologia LoRaWAN por meio da realização de experimentos com transmissão de sinais com diferentes valores de fator de espalhamento, nível de ruído e potência;

- Avaliar o desempenho dos dois gateways LoRaWAN em diferentes condições de operação, através da plataforma de testes de gateways LoRaWAN, a fim de determinar qual é o modelo mais eficiente e confiável; e
- Produzir, submeter e publicar em revista de relevância internacional, pelo menos, um artigo científico, decorrente dos trabalhos apresentados nesta dissertação.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está distribuído em seis capítulos, conforme organização descrita a seguir: no Capítulo 2 são apresentadas as arquiteturas e tecnologias relacionadas à Internet das Coisas. Nesse capítulo, as principais especificações para padronização de conceitos, sistemas, tecnologias, relações e outros aspectos voltados à IoT são apresentados sob a perspectiva dos três principais padrões relativos ao tema. Além disso, no Capítulo 2 também são expostas a classificação das principais tecnologias aplicadas no campo da Internet das Coisas e uma visão geral dos principais protocolos de rede relacionados. No Capítulo 3, são detalhadas as características e especificações do padrão LoRaWAN. Além disso, também são apresentadas informações sobre plataformas e *gateways* LoRaWAN. No Capítulo 4, é apresentada a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho, com detalhamento do SDR e demais ferramentas utilizadas. Também são descritos o processo de desenvolvimento da plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN e os procedimentos adotados para a realização de testes. No Capítulo 5 são expostos os resultados dos testes promovidos, associados a discussões e análises. Por fim, no Capítulo 6, são descritas as conclusões desta dissertação e as possibilidades de trabalhos futuros.

2 ARQUITETURAS E TECNOLOGIAS DE INTERNET DAS COISAS

Neste capítulo são apresentados tópicos importantes relacionados à Internet das Coisas, com o objetivo de contextualizar a plataforma apresentada nesta dissertação. Na primeira seção são expostos os padrões arquiteturais de Internet das Coisas, que norteiam o desenvolvimento, projeto e implementação de sistemas. Essas normatizações contemplam os desafios, campos de aplicação e relações entre os elementos de IoT. Na segunda seção são apresentadas as principais tecnologias utilizadas no âmbito da Internet das Coisas. A partir de uma abordagem comparativa, é justificada a importância de estudos voltados à tecnologia LoRaWAN.

2.1 ARQUITETURAS DE REFERÊNCIA DE INTERNET DAS COISAS

A implementação de soluções no contexto da Internet das Coisas está associada a um conjunto de desafios. Muitos desses já são observados nas aplicações de internet em geral. Mas, com a constante e acentuada inserção de novos dispositivos conectados, através de tecnologias diversas, alguns aspectos ganharam relevância. Stankovic (2014) cita algumas áreas temáticas relacionadas ao impacto do crescimento da IoT: escalabilidade, arquitetura, robustez, intenso fluxo de dados, tecnologias *open-source*, segurança e privacidade, incluindo as questões biopsicossociais humanas, uma vez que as pessoas também estão inseridas na IoT.

A partir disso, surgiram iniciativas de setores diversos da sociedade, no sentido de minimizar e solucionar esses problemas. Uma importante ferramenta para garantir uniformidade, compatibilidade e segurança é a escolha e definição de um padrão de referência. Essa normatização objetiva auxiliar no processo de implementação das tecnologias e orientar as relações existentes entre os elementos. Breivold (2017) lista os mais relevantes padrões de referência associados à Internet das Coisas, a saber:

- IEEE Std 2413-2019,
- IoT-A (*Internet of Things - Architecture*), e
- IIRA (*Industrial Internet Reference Architecture*).

Um detalhamento desses padrões é exposto a seguir, tratando dos seus princípios e particularidades.

2.1.1 Padrão IEEE Std 2413-2019

Em 2015, o IEEE orientou o desenvolvimento de um padrão para definir um *framework* arquitetural para Internet das Coisas. Esse desenvolvimento foi concluído em

2020, com a publicação do padrão IEEE Std 2413-2019 *Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things* (IoT). Essa normatização é organizada em quatro partes: domínios de IoT, similaridade entre domínios e preocupações compartilhadas, *framework* arquitetural para IoT e exemplos de arquiteturas de IoT.

O padrão IEEE Std 2413-2019 destaca suas três principais finalidades. O primeiro objetivo que consiste em possibilitar aos fornecedores compatibilidade e segurança dos sistemas. O segundo propósito é garantir a possibilidade de avaliação e comparatividade para os consumidores. Enquanto, a terceira finalidade consiste em fornecer ferramentas para acelerar o processo de projeto e implementação dos desenvolvedores de sistemas (IEEE, 2020). Dessa forma, é perceptível a busca pela construção de uma estrutura que viabilize a operação dos sistemas de IoT, de modo a atender eficientemente as necessidades dos agentes envolvidos.

O documento descreve uma perspectiva acerca dos conceitos que envolvem a Internet das Coisas. Assim, os conceitos dos elementos relacionados ao tema são delimitados a partir da sua definição da coisa e suas características básicas (funções, propriedades e transferência de dados), representadas através da Figura 1. É apresentado também, o conceito de ambiente IoT, que corresponde ao conjunto de componentes que compõem a Internet das Coisas. Esse contexto também abrange os elementos utilizados para a construção de sistemas de IoT.

Figura 1 – Representação do conceito de coisa conforme o padrão IEEE Std 2413-2019.



Fonte: Adaptado de IEEE (2022).

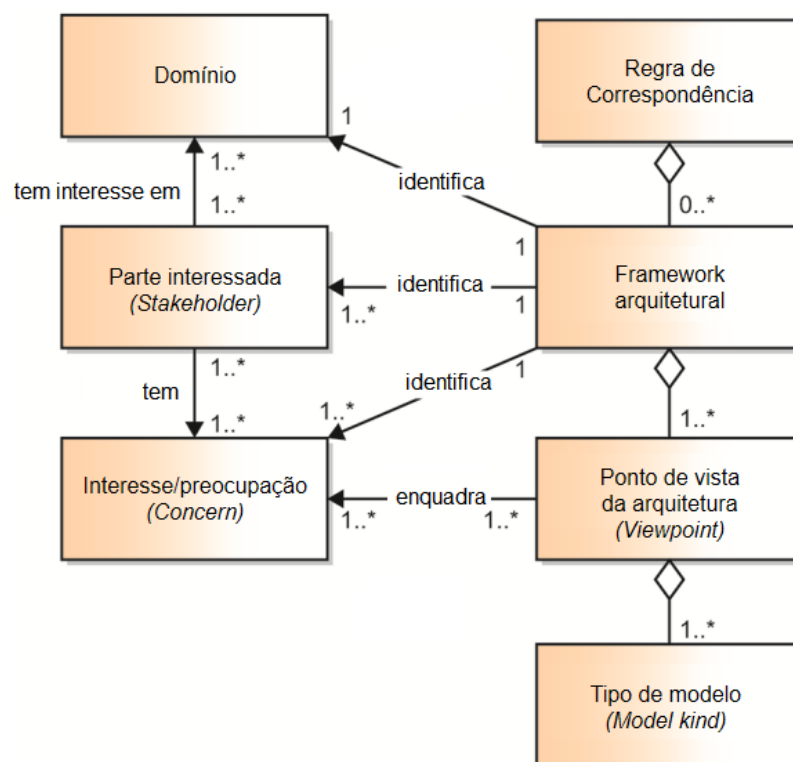
De acordo com o padrão IEEE Std 2413-2019, a ideia central da Internet das Coisas está na sua interação com entidades físicas, que podem ser elementos diversos, tais

como: pessoas, sistemas computacionais, dispositivos mecânicos, entre outros. Para superar os desafios da Internet das Coisas, são apresentadas características importantes que um sistema IoT deve possuir: interoperabilidade, dinamicidade, compatibilidade, confiabilidade, resiliência e credibilidade.

O padrão IEEE Std 2413-2019 foi construído em conformidade com o padrão internacional ISO/IEC/IEEE 42010:2011 *Systems and software engineering*, que determina o método de organização e descrição de arquiteturas de sistemas.

Na Figura 2 é mostrado o modelo conceitual, que compreende a relação existente entre os elementos do *framework* arquitetural.

Figura 2 – Modelo conceitual de framework arquitetural da IEEE Std 2413-2019.



Fonte: Adaptado de IEEE (2022).

Essa descrição de arquitetura é constituída de um conjunto de *viewpoints* (pontos de vista, em tradução direta), que enquadram os interesses ou preocupações (*concerns*) de um grupo específico de *stakeholders*, que são as partes interessadas. Por conseguinte, o *framework* arquitetural é estabelecido como o conjunto das *viewpoints*. A parte interessada corresponde aos agentes que têm interesse no sistema, como os desenvolvedores, consumidores, fornecedores de insumos e agências reguladoras. Os interesses dos *stakeholders* envolvem os fatores e qualidades relacionados ao sistema. São alguns exemplos de *concerns*: a operabilidade, o custo, a complexidade e a autonomia (IEEE, 2020).

Os *model kinds* (tipos de modelos) orientam a construção dos modelos de arquitetura, que são representações mais realistas do sistema. O domínio refere-se ao conjunto de sistemas de Internet das Coisas que possuem características comuns, relacionado ao campo de aplicação das tecnologias. Assim, cada domínio está associado a um modelo conceitual, e consequentemente, compõe um conjunto de interesses, *stakeholders* e *viewpoints*. O padrão IEEE 2413-2019 descreve seis importantes domínios, listados a seguir: *Smart Manufacturing* (Manufatura Inteligente), *Smart Grid* (Rede Elétrica de Potência Inteligente), *Smart Buildings* (Prédios Inteligentes), *Intelligent Transport* (Transporte Inteligente), *Smart Cities* (Cidades Inteligentes) e *Healthcare* (Cuidados com a saúde).

2.1.2 Padrão IoT-A

Instituições europeias relacionadas à IoT, como empresas de tecnologia e centros de pesquisa, em conjunto com o projeto da União Europeia *Lighthouse*, dedicaram-se à criação de um Modelo de Arquitetura de Referência para Internet das Coisas (IoT ARM). O projeto foi concluído em 2013, com a publicação do padrão *Internet of Things – Architecture* (IoT-A). A construção desse documento teve por objetivo estabelecer um modelo para orientar o projeto de sistemas relacionados à Internet das coisas, de forma a garantir a compatibilidade de sistemas e escalabilidade das tecnologias (IOT-A, 2022). Na perspectiva desse padrão, a Internet das Coisas é vista como um conceito genérico para a interconexão de tecnologias, dispositivos, objetos e serviços (BREIVOLD, 2017).

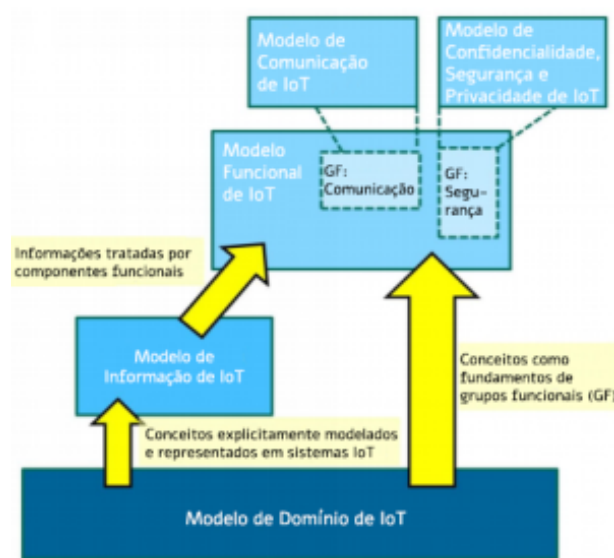
O projeto IoT-A está voltado para os aspectos funcionais de implementação da IoT, tais como os protocolos, interfaces, mecanismos e infraestrutura. Seu desenvolvimento foi baseado na metodologia Volere, fundamentada na descrição dos requisitos necessários à arquitetura (IOT-A, 2022). De acordo com Weyrich e Ebert (2016), o IoT-A ocupa-se principalmente de modelar e estruturar os processos, serviços e entidades, a partir de apresentação abstrata dos diferentes pontos de vista a seguir: funcionais, de informações e de domínios.

O IoT-A define que a maior contribuição de um IoT é o próprio Modelo de Referência, associado aos conceitos e definições das arquiteturas de Internet das Coisas. O padrão estabelece ainda que os modelos são constituídos de sub-modelos. E cada um desses corresponde a um diferente aspecto do sistema. Na Figura 3 é representada a interação entre os sub-modelos. O Modelo de Domínio IoT (*IoT Model Domain*) é considerado o domínio chave, associado aos conceitos relevantes de Internet das Coisas (BAUER et al., 2013).

2.1.3 Padrão IIRA

O padrão *Industrial Internet Reference Architecture* (IIRA) foi elaborado pelo *Industrial Internet Consortium* IIC. O órgão é formado por instituições de pesquisa e

Figura 3 – Interação entre sub-modelos do padrão IoT-A.

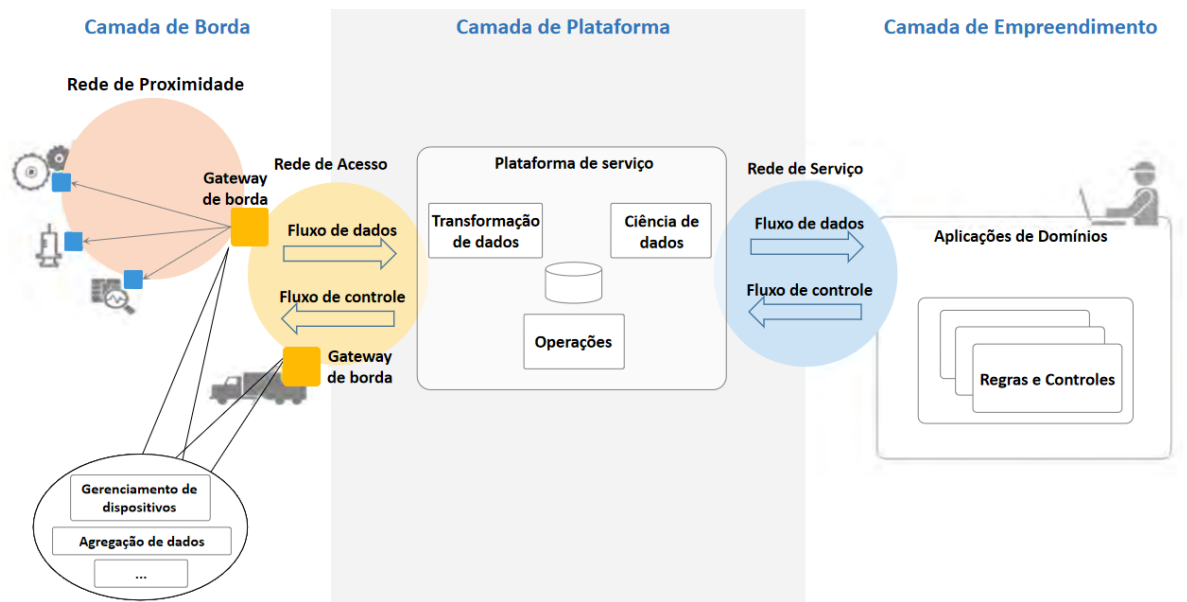


Fonte: Adaptado de Bauer et al. (2013).

empresas. O padrão IIRA foi publicado em 2015, e seu foco é na área industrial. Isto é, o documento estabelece um modelo de arquitetura de referência de Internet da Coisas para aplicações em ambientes Industriais (WEYRICH; EBERT, 2016). Dessa forma, a normatização está inserida no contexto da Internet das Coisas Industriais IIoT. Um dos principais modelos proposto pelo padrão é denominado (*three-tier*), pois ele é composto de três camadas, conforme é ilustrado na Figura 4. E cada uma dessas camadas contém determinados elementos da rede, de acordo com sua finalidade. A camada de borda compreende os dispositivos finais e os gateways. O pilar central é o da plataforma, onde ocorre o gerenciamento da rede. E, por fim, a camada de empreendimento está relacionado com as análises de dados e tomadas de decisões. Nessa camada estão inseridas as aplicações.

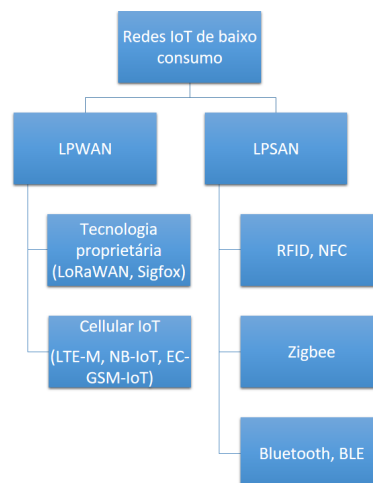
2.2 TECNOLOGIAS DE REDES APLICADAS À INTERNET DAS COISAS

A necessidade de baixo consumo de energia, baixa taxa de dados e a alta latência devido à localização dos diferentes sistemas, impulsionou o desenvolvimento de novos padrões de rede aplicados à IoT, categorizados principalmente como Redes de Curto Alcance e Baixa Potência (*Low Power Short Area Network* - LPSAN) e Redes de Longo Alcance e Baixa Potência (*Low Power Wide Area Network* - LPWAN) (MEKKI et al., 2019). Na Figura 5 é ilustrada a classificação de redes e as principais tecnologias aplicadas à Internet das Coisas.

Figura 4 – Modelo de arquitetura *three-tier* do padrão IIRA.

Fonte: Adaptado de Lin et al. (2019).

Figura 5 – Diagrama de classificação das principais redes aplicadas à IoT.



Fonte: Adaptado de Zanaaj et al. (2021).

2.2.1 LPSAN

As tecnologias categorizadas como LPSAN são comumente associadas às *Wireless Sensor Networks* (WSN), que em tradução para a língua portuguesa, corresponde às Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). De modo geral, essas tecnologias utilizam o espectro não licenciado. São destaque, entre as LPSAN, os protocolos *ZigBee*, e BLE. A tecnologia *ZigBee*, implementada pela *ZigBee Alliance*, é bastante adotada em aplicações domésticas e pessoais de IoT, devido a sua eficiência energética e largura de banda. O protocolo *Bluetooth Low Energy* (BLE) foi desenvolvido pelo *Bluetooth Special Interest Group* (Bluetooth SIG).

A versão de baixo consumo do Bluetooth pode operar em modo de hibernação e possui controle de ativação, mantendo as mesmas funcionalidades da versão original do Bluetooth, mas com aplicação mais adequada para fins que não exijam alta taxa de transferência de dados (ZANAJ et al., 2021).

2.2.2 LPWAN

As redes LPWAN apresentam elevada eficiência energética e destacam-se por alcançar longas distâncias, podendo atingir entre 10 e 40 km em zonas rurais e até 5 km em zonas urbanas. Ademais, essa tecnologia é subdividida em redes que usam espectro licenciado, denominado Cellular IoT e apresentado sob a formas de NB-IoT e LTE-M, assim como não licenciados, como os protocolos LoRaWAN e Sigfox. Para transmitir quantidades pequenas de dados mostra-se como a forma mais eficaz a longas distâncias (ZANAJ et al., 2021).

Uma das redes do subgrupo que fazem uso de espectro licenciado é a tecnologia de banda estreita NB-IoT que tem sido implementada na Europa e na China desde 2016. Ela possui 200 kbps de taxa de dados máxima e tem um alcance limitado a 1 km na área urbana e 10 km na rural, não tem taxas de dados adaptáveis, mostra baixa imunidade a interferência e contém criptografia LTE em seu protocolo de comunicação. Portanto, seu perfil de baixa latência e alta transmissão de dados torna-o bem aplicável em pontos de venda de lojas, negócios de medição elétrica e para controle remoto de maquinários em fábricas. Essas especificações de cobertura estendida e de qualidade do sinal de rede são também são aplicadas à tecnologia LTE-M. Esse protocolo apresenta baixa latência na troca de dados por suportar modos *Time Division Duplex* (TDD) e *Frequency Division Duplex* (FDD), por isso seus dispositivos são melhor adequados em aplicações de comunicação de emergência em cidade inteligentes (MEKKI et al., 2019).

No subgrupo das redes não licenciadas está a tecnologia de banda ultraestreita desenvolvida pela startup francesa Sigfox e que recebe o mesmo nome, no qual a taxa máxima de dados é de 100 bps, com alcance de 10 km na zona urbana e 40 km na zona rural, no entanto, sobressai-se com uma altíssima imunidade a interferência, devido ao uso eficiente das bandas de frequência apesar de não suportar criptografia e não ter taxas de dados adaptáveis. Por outro lado, a tecnologia de camada física de propriedade da Semtech, LoRaWAN, foi padronizada pela associação LoRa-Alliance, seis anos após o seu desenvolvimento pela startup Cycleo, e destaca-se por apresentar uma maior taxa de dados, de até 50 kbps. Comparada ao Sigfox, o alcance da tecnologia LoRaWAN é próximo à metade e necessita de um custo maior de implementação, pois necessita da implantação de gateways (dado que Sigfox disponibiliza sua rede de gateways, a um certo custo), porém tem como vantagens a recepção de dados por várias estações de base (gateways) simultaneamente, o que em contrapartida a torna mais confiável em redes

locais. Diferencia-se também por apresentar autenticação, criptografia (AES 128b) e taxas de dados adaptáveis. Apesar dos contrastes técnicos entre as duas tecnologias, SigFox e LoRaWAN, ambas são indicadas, por exemplo, para aplicações agrícolas, bem como em aplicativos para monitorar segurança e manutenção de imóveis por atender a exigência de dispositivos com bateria de vida útil duradoura e baixo custo (MEKKI et al., 2019).

3 LORAWAN

LoRaWAN é um protocolo de rede amplamente utilizado no contexto da Internet das Coisas, graças às suas principais características, por exemplo, elevado tempo de vida útil das baterias em seus dispositivos, eficiência energética, longo alcance e alta imunidade à interferência (SILVA et al., 2017). LoRaWAN foi desenvolvida para possibilitar a comunicação de dispositivos ligados à internet com aplicações em servidores remotos, através de conexões sem fio de longo alcance. A nomenclatura empregada no padrão é relacionada à tecnologia utilizada na sua camada física, que utiliza a modulação LoRa. Neste capítulo, são apresentadas as características técnicas do protocolo, plataformas e *gateways* LoRaWAN.

3.1 CAMADA FÍSICA (LORAPHY)

O termo LoRa é uma abreviação da expressão “*long range*” (longo alcance), que explicita o principal propósito da tecnologia. De acordo com Slat (2020), o desenvolvimento da modulação LoRa teve início em 2009, quando, Nicolas Sornin e Olivier Seller iniciaram a produção de uma técnica de modulação de longo alcance e baixo consumo de energia. Em 2010, em conjunto com François Sforza, criaram a empresa Cycleo, que tinha o objetivo inicial de fornecer uma solução para a indústria de medição de insumos, como gás e eletricidade. A Semtech, uma empresa americana, apresentou interesse na tecnologia, e em função da boa perspectiva sobre ela, adquiriu a Cycleo em Maio de 2012.

A modulação LoRa é baseada em uma técnica que utiliza espalhamento espectral, denominada CSS (*Chirp Spread Spectrum*), em que os dados são interpretados por meio de sinais de radiofrequência de frequência variável. Nessa técnica, ocorre o espalhamento de um sinal no domínio da frequência. Dessa forma, a largura de banda do sinal de transmissão é muitas vezes maior que a largura de banda do sinal da informação, consistindo em meio seguro contra ruídos e interceptações. Os valores de largura de banda padronizados na modulação LoRa são de 125 kHz, 250 kHz e de 500 kHz, a depender do canal utilizado. Apesar disso, esse padrão utiliza fatores de espalhamento ortogonais (*Spreading Factor*), proporcionando otimizações no consumo de energia e na taxa de transferência de dados (SEMTECH, 2019a).

Na modulação LoRa, o sinal que contém a informação apresenta uma codificação digital. Esse sinal é constituído de um conjunto de símbolos, denominados de *chirps* (*Compressed High Intensity Radar Pulse*), obtido a partir do espalhamento do sinal transmitido. Cada *chirp*, ilustrado na Figura 6, corresponde a uma unidade de informação que compõe o pacote de dados. Essa unidade básica, é chamada de *chirp*, para diferenciá-la dos bits que compõem o dado binário. E cada *chirp* corresponde a um conjunto de bits (SEMTECH, 2019a).

A expressão que descreve o sinal utilizado na modulação CSS é apresentada a seguir (FIALHO; AZEVEDO, 2018).

$$s(t) = e^{j(2\pi f_c t + 2\pi \frac{\beta}{2} t^2)} \quad (3.1)$$

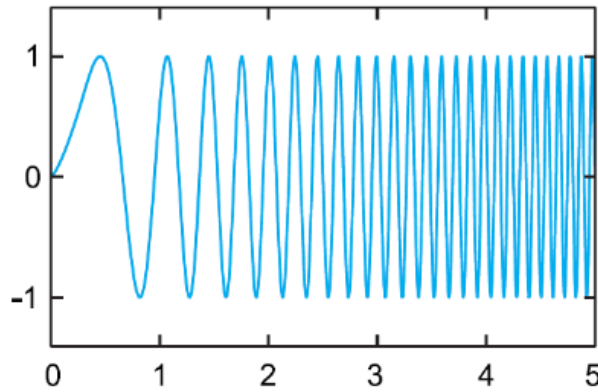
em que β é a taxa de variação da frequência em relação ao tempo.

De acordo com Lathi e Ding (2008), a largura de banda BW (*bandwidth*) de um canal “é a faixa de frequências que podem ser transmitidas pelo canal com razoável fidelidade”. Na modulação LoRa, a largura de banda de um *chirp* é equivalente à largura de banda espectral do sinal (SEMTECH, 2015). Dessa forma, é possível afirmar que a diferença entre a maior e a menor frequência do sinal corresponde à largura de banda do *chirp*; e T_{symbol} é o intervalo de duração do sinal (*chirp*), o valor de β pode ser calculado como:

$$\beta = \frac{BW}{T_{symbol}} \quad (3.2)$$

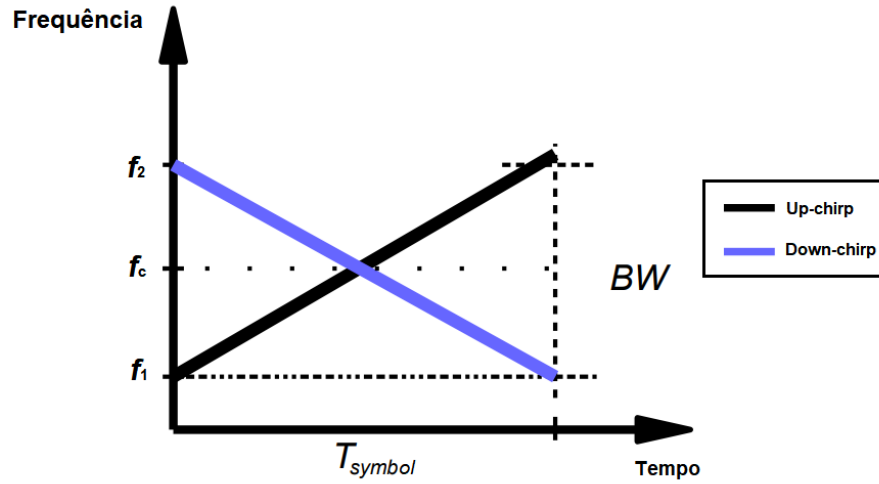
Os *chirps* podem ser do tipo *up-chirp*, quando há um aumento da frequência com o tempo, e *down-chirp*, quando há uma diminuição da frequência no sinal. Na Figura 6 é ilustrado um sinal do tipo *up-chirp*.

Figura 6 – Forma de onda de um *up-chirp*.



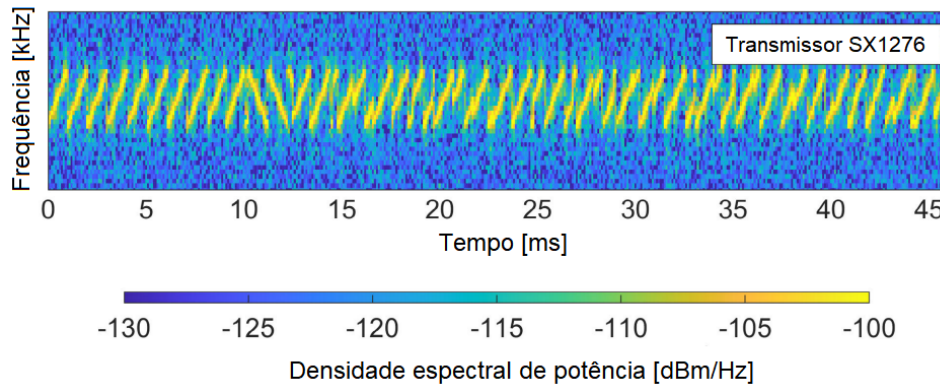
Fonte: Semtech (2019a).

A visualização do sinal através da representação com espectrograma permite identificar a relação direta entre a largura de banda e o tempo do símbolo (período do *chirp*, T_{symbol}). Essa representação, observada na Figura 7 está associada à descrição dos frames dos pacotes de dados na rede LoRaWAN, que são compostos por uma série de símbolos. De maneira que, cada símbolo corresponde a um conjunto de *bits*. Os diferentes conjuntos de bits representados por meio de símbolos são os *chips*.

Figura 7 – *Up-chirp* e *down-chirp* representados através de espectrograma.

Fonte: Adaptado de Fialho e Azevedo (2018).

Na Figura 8, a densidade espectral de potência de um transmissor de sinais é apresentada, permitindo estabelecer uma relação entre os *chirps*, que constituem o sinal, e o *frame* de um dado em uma rede LoRaWAN.

Figura 8 – Representação de um *frame* de sinal LoRa por meio de espectrograma.

Fonte: Adaptado de Homssi et al. (2021).

3.2 ESPECIFICAÇÕES DA TECNOLOGIA LORAWAN

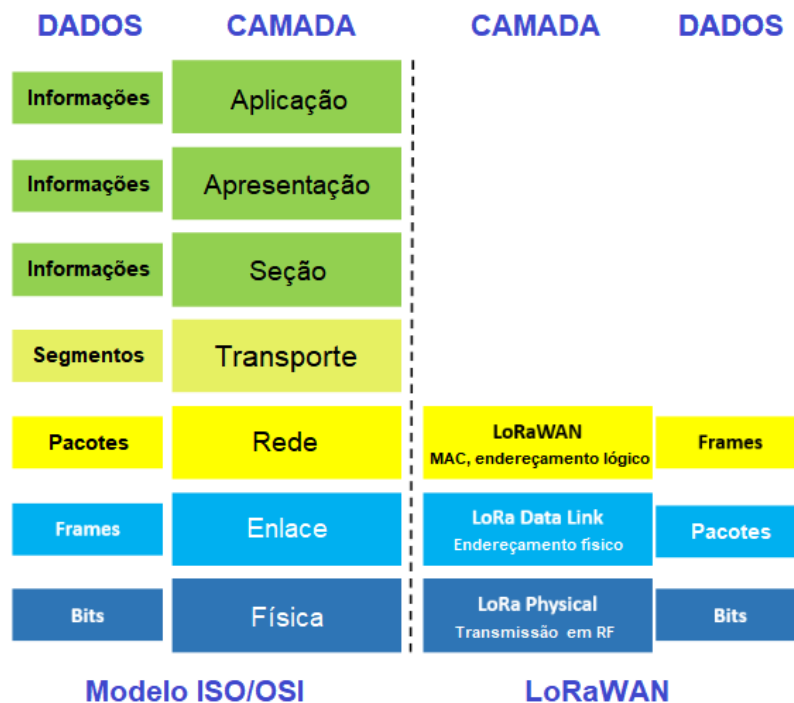
Com o intuito de garantir a integração dos dispositivos em rede, foram agregados outros protocolos além da camada física estabelecida pela modulação LoRa. A associação desse conjunto de protocolos constitui o padrão de rede LoRaWAN.

Em 2015, foi fundada a *LoRa Alliance*, uma organização sem fins lucrativos constituída de instituições interessadas no desenvolvimento da rede LoRaWAN (FIALHO;

AZEVEDO, 2018). De acordo com a Semtech, a associação tem o objetivo de “apoiar e promover a adoção global do padrão LoRaWAN, garantindo a interoperabilidade de todos os produtos e tecnologias LoRaWAN” (SLATS, 2020).

Com base nas definições do modelo de referência ISO/OSI (*Open Systems Interconnection*) de redes de computadores, proposto pela ISO (*International Organization for Standardization*), é possível identificar as camadas existentes em uma rede LoRaWAN. Conforme ilustrada na Figura 9, a tecnologia LoRa é utilizada na camada física, enquanto na camada de enlace de dados (*LoRa Data Link*) ocorre o encapsulamento dos bits, formando os pacotes de dados, e a composição de quadros na camada de rede.

Figura 9 – Representação do modelo ISO/OSI e das camadas de rede LoRaWAN.

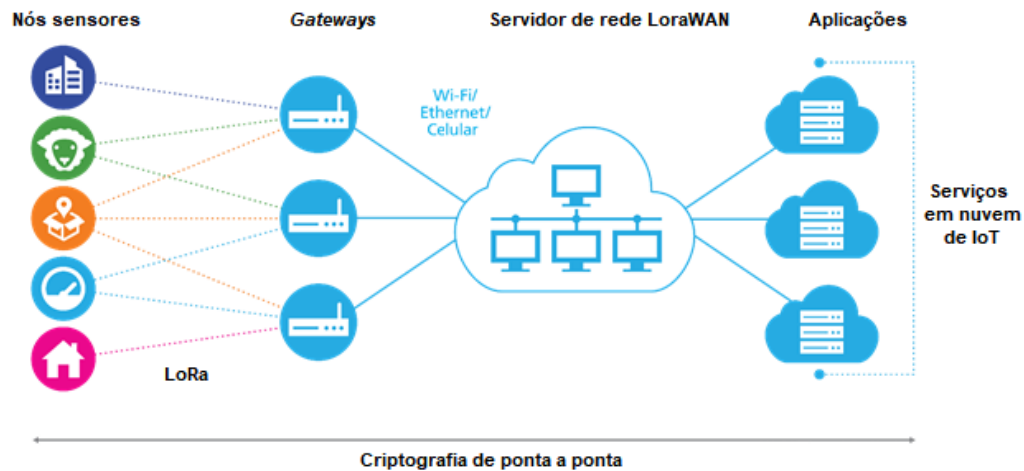


Fonte: Adaptado de Semtech (2019a).

A arquitetura da rede LoRaWAN, apresentada na Figura 10, detalha os seus componentes gerais. Os diversos dispositivos na borda da estrutura são os nós, ou dispositivos finais (*end devices*), cuja função é recolher dados ou informações do espaço físico e encaminhar para a rede, quando atuam como sensores. Mas esses elementos também pode ser atuadores, que promovem variações nos sistemas físicos a partir de comandos provenientes do servidor. Entretanto, em redes LoRaWAN é mais comum que os dispositivos finais operem como sensores.

Os gateways LoRaWAN efetuam a intermediação dos dados entre os nós e os servidores. Com isso, existem dois sentidos de tráfego de dados entre gateway e nó. A transmissão de sinal do nó para o gateway é denominada *uplink*. E o *downlink* é a

Figura 10 – Arquitetura de rede LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de Beitler, Caracas e Fuller (2020).

transmissão no sentido inverso. O LNS (LoRaWAN *Network Server*), ou Servidor de rede LoRaWAN, na tradução para o português, efetua o gerenciamento de toda a rede. O que inclui o controle sobre autenticação de novos dispositivos na rede, ajuste de taxas de dados dos nós, gerenciamento de endereços e ordenação de dados trafegados. De acordo com o padrão, todas essas funcionalidades devem ocorrer sem que o servidor de rede decifre o dado, que possui criptografia de ponta a ponta. Portanto, o Servidor LoRaWAN deve garantir a autenticidade dos nós e a segurança no encaminhamento dos dados, e sua instalação pode estar na rede local – no próprio gateway, inclusive – ou remota por meio da computação em nuvem (SEMTECH, 2015).

A aplicação consiste no sistema de processamento de dados, que opera de acordo com a finalidade da rede. São exemplos de aplicações: banco de dados, *dashboards*, ferramentas computacionais de IA (Inteligência Artificial), entre outros.

Na Figura 10 também são ilustrados os protocolos que envolvem os meios físicos de transmissão de dados. Entre o nó e o gateway ocorre uma transmissão de sinal utilizando o padrão LoRa, enquanto o gateway conecta-se ao servidor LoRaWAN através de um meio convencional, como os padrões Ethernet, Wi-Fi ou Rede Móvel de Celular.

O protocolo de rede LoRaWAN possui parâmetros de operação e conceitos importantes inerentes à sua estrutura, que são tratados e detalhados a seguir (SORNIN et al., 2016):

- **Spreading factor (SF):** O Fator de Espalhamento, em português, é um coeficiente que estabelece a relação entre a duração do símbolo e a largura de banda. De forma que, quanto maior o tempo do símbolo, maior também é o SF;

- **Chip rate (R_c):** É a taxa de *chips*. Isto é, a quantidade de *chips* transmitidos a cada segundo. Apresenta valor igual ao BW. Assim, em uma transmissão com largura de banda igual a 125 kHz, o valor de R_c é igual a 125.000 chips/s;
- **Symbol rate (R_s):** É a taxa de símbolos transmitidos por segundo. A Equação 3.3 exhibe a relação entre a R_s , a Largura de Banda BW e o Fator de Espalhamento SF ;

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3.3)$$

- **Data rate (DR):** É a taxa de transmissão de dados, medida em bits por segundo (bits/s).
- **Code rate :** A taxa de código, em tradução para o português, consiste em um indicador que determina o número de *bits* incrementados nos pacotes de dados transmitidos. A finalidade dessa adição é garantir a integridade da mensagem e a correção de erros em caso de perdas por interferência, por exemplo. Esse método de correção utilizado no padrão LoRaWAN é denominado FEC (*Forward Error Correction*), cujo detalhamento de técnicas aplicadas é apresentado na seção 4.3.1;
- **Time on Air (ToA):** É o tempo de duração do sinal do pacote de dados;
- **Adaptative data rate (ADR):** É um mecanismo que gerencia os parâmetros do dispositivos, de forma a obter seu melhor aproveitamento energético. Para esse objetivo, ele controla o fator de espalhamento, a largura de banda e a potência de transmissão;
- **Método de ativação:** Consiste na técnica utilizada para conectar um dispositivo na rede LoRaWAN. O método *Over-the-air Activation* (OTAA) é o mais seguro, pois utiliza identificadores junto às chaves de segurança criptográficas na solicitação de acesso enviada ao *gateway*, que retorna com uma resposta à solicitação. Na técnica *Activation by Personalization* (ABP), o dispositivo é imediatamente conectado à rede, sem que haja uma solicitação de conexão enviada pelo nó. E também não há envio de resposta, confirmando a conexão, para o dispositivo final;
- **Classes de dispositivos:** São três as classes de dispositivos na rede LoRaWAN (Classe A, B e C), que se diferenciam principalmente pela forma como se comunicam com o *gateway*, a fim de promover melhor aproveitamento no consumo de energia. O dispositivo final classe A permite a realização de *downlink* em dois intervalos específicos, que ocorrem após um *uplink*, e depois de períodos pré-estabelecidos. Não havendo *downlink*, o dispositivo só liga o receptor após a necessidade de enviar novo dado. Os nós da classe B realizam ciclos com período definido, nos quais os *uplinks* são seguidos de um conjunto de intervalos de tempo específicos para a realização de

downlinks. Os elementos de classe C não possuem um período fixo entre a realização dos *uplinks*. Esses dispositivos operam de forma semelhante aos nós de classe A, com uma exceção. Nesse caso, o segundo intervalo de abertura do rádio para ocorrência de *downlink* é contínuo, permanecendo assim até que seja necessário realizar novo *uplink*. Em síntese, quando se trata de sensores, é mais adequado utilizar nós de classe A, quando a latência for elevada, e B, quando o envio de dados precisa ser contínuo. Enquanto os dispositivos de classe C são direcionados para aplicações onde os nós operam como atuadores;

- **Parâmetros regionais:** A frequência portadora em uma rede LoRaWAN possui valores padronizados, que varia de acordo com a região onde está instalado o sistema. De acordo com determinação da especificação do protocolo e homologação da Anatel, no Brasil é utilizada a faixa de valores no padrão da Austrália, entre 915 MHz e 928 MHz (ANATEL, 2020).

A utilização de radiofrequência para a comunicação sem fio envolve um conjunto de propriedades e conceitos relacionados à propagação de ondas eletromagnéticas. Esses aspectos apresentam extrema relevância para análise dos sinais, e permitem indicar as suas características de forma quantitativa (PHUNG et al., 2018). As especificações da tecnologia LoRaWAN detalham as faixas e limites de operação da camada física, com base em alguns indicadores. O RSSI e a SNR são importantes parâmetros utilizados na verificação do sinal. Esses indicadores são registrados em cada pacote de dados recebido no servidor.

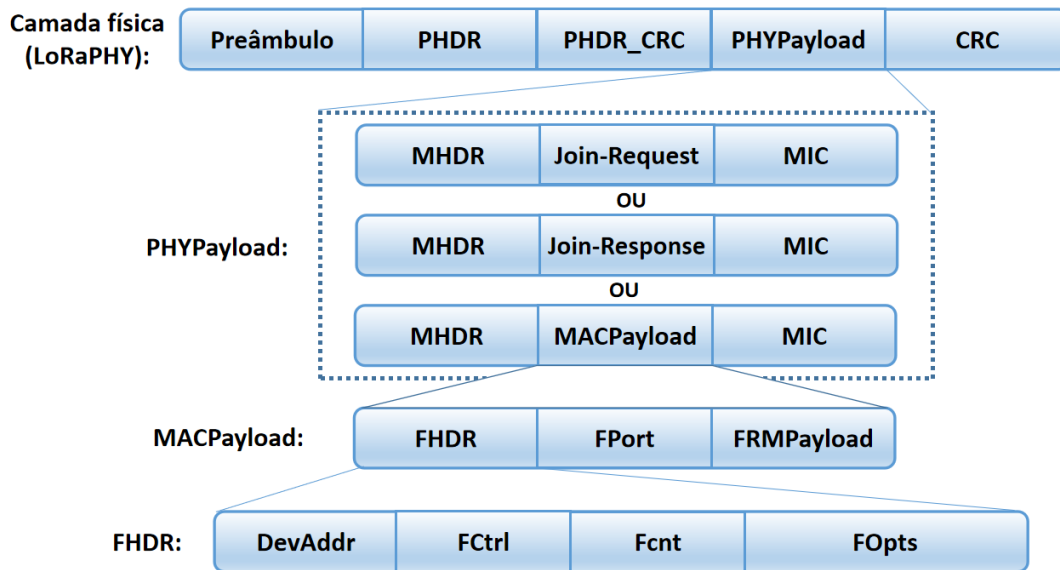
- **Signal-to-noise ratio (Relação sinal-ruído):** É a razão entre a potência do sinal recebido e o nível de potência média do ruído. A SNR de transmissão de sinais de rádio com modulação LoRa apresenta valores típicos entre -20 dB e 10 dB. Mas há um limite de valor de SNR para cada fator de espalhamento utilizado (SWAIN et al., 2021);
- **Received Signal Strength Indicator (RSSI):** O Indicador de Intensidade do Sinal Recebido corresponde à potência do sinal recebido, expressa em dBm. O parâmetro permite estabelecer a sensibilidade do receptor.

3.3 FORMATO DE MENSAGENS NO PROTOCOLO LORAWAN

O formato de mensagens, utilizado na tecnologia LoRaWAN é apresentado na Figura 11, em que é ilustrado como ocorre o encapsulamento de dados de acordo com as especificações do protocolo, considerando-se todas as suas camadas.

A seguir são detalhados todos os elementos da estrutura da mensagem de camada física (LoRaPHY), que contempla o encapsulamento dos pacotes da camada de Controle

Figura 11 – Estrutura de pacotes no protocolo LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de Sornin et al. (2016).

de Acesso ao Meio (MAC), de acordo com as especificações da versão 1.0.2 do protocolo LoRaWAN (SORNIN et al., 2016):

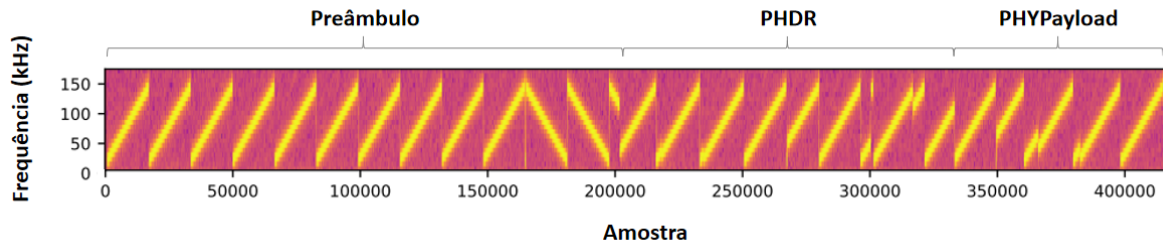
- **Preâmbulo:** É composto de um conjunto de símbolos utilizados para registrar o início de uma mensagem, e promover a sincronização do quadro e da frequência. Por padrão, utilizam-se 8 bytes para indicar o início da mensagem, mas o número pode variar. Esses são seguidos de um conjunto de bytes de sincronização;
- **PHDR:** O cabeçalho de camada física é um campo de utilização opcional, e pode ser utilizado para indicar o tamanho da mensagem, taxa de código e a presença de um código de verificação de erro (CRC) do *PHYPayload*. Essa estrutura pode ser omitida, de forma que os parâmetros sejam inseridos no conteúdo do campo *PHYPayload*, que corresponde ao modo de operação implícito. Quando as informações do cabeçalho estão inseridas em PHDR, indica que a funcionalidade está em modo explícito;
- **PHDR_CRC:** É a checagem por código de redundância cíclica (*checksum*) do PHDR para garantir a integridade da transmissão do conteúdo do PHDR;
- **PHYPayload:** O *Payload* da camada física contém a carga útil na comunicação. Devido ao acréscimo de dados em outras camadas do protocolo LoRaWAN, além da mensagem, outras informações referentes ao Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control* - MAC), da camada de enlace de dados (LoRaWAN MAC) estão contidas em PHYPayload;

- **CRC:** Contém o (*checksum*) do *Payload* da camada física. No protocolo LoRaWAN, o CRC é utilizado apenas nas mensagens de *uplink*;
- **MHDR:** É o cabeçalho do pacote LoRaWAN. O campo, que ocupa um *byte*, é utilizado para indicar o tipo de mensagem e a versão do protocolo utilizada. Há seis tipos de mensagens possíveis (Os dois primeiros tipos são utilizados durante a ativação do dispositivo através do método OTAA, enquanto os demais são utilizados para transmissão de dados):
 1. Requisição de conexão (*join request*);
 2. Admissão de conexão (*join accept*);
 3. Envio de dado para o servidor sem confirmação (*unconfirmed data up*);
 4. Envio de dado do servidor sem confirmação (*unconfirmed data down*);
 5. Envio de dado para o servidor com confirmação (*confirmed data up*); e
 6. Envio de dado do servidor com confirmação (*confirmed data down*).
- **MACPayload:** O Payload do pacote LoRaWAN contém a carga útil da camada MAC, ou seja, o conteúdo da mensagem e as informações do transporte de dados da camada;
- **MIC:** É o código de integridade da mensagem. A verificação de integridade da mensagem é feita a partir da utilização de uma chave criptográfica, denominada *NwSKey*;
- **FHDR:** O cabeçalho do quadro é o campo que contém informações sobre o endereço do dispositivo (*DevAddr*), dados de controle (*Fctrl*), o número de ordem na contagem de quadros transmitidos (*Fcnt*) e dados de comandos opcionais relacionados ao transporte da subcamada LoRaWAN MAC. No campo *Fctrl*, são reservados os bits que determinam se os mecanismos ADR e se a mensagem de confirmação de dados (ACK) estão habilitados;
- **FPort:** O campo de porta é aplicado na indicação do conteúdo do campo *FRMPayload*, que também pode ser utilizado para transmitir comandos da subcamada LoRaWAN MAC. Sua utilização prevê a realização de testes e futuras funcionalidades do protocolo;
- **FRMPayload:** É o *payload* do quadro MAC. Contém a mensagem transmitida criptografada. Se *FPort* apresentar valor nulo, *FRMPayload* carrega comandos da subcamada LoRaWAN MAC.

Na Figura 12 é mostrada, através do registro do espectrograma de frequência de um sinal LoRa transmitido por um rádio transmissor integrado modelo RN2483, a

correspondência entre os símbolos transmitidos e os campos de um pacote da camada física LoRaPHY.

Figura 12 – Ilustração do espectrograma de frequência de um sinal LoRa gerado a partir de um transmissor RN2483.



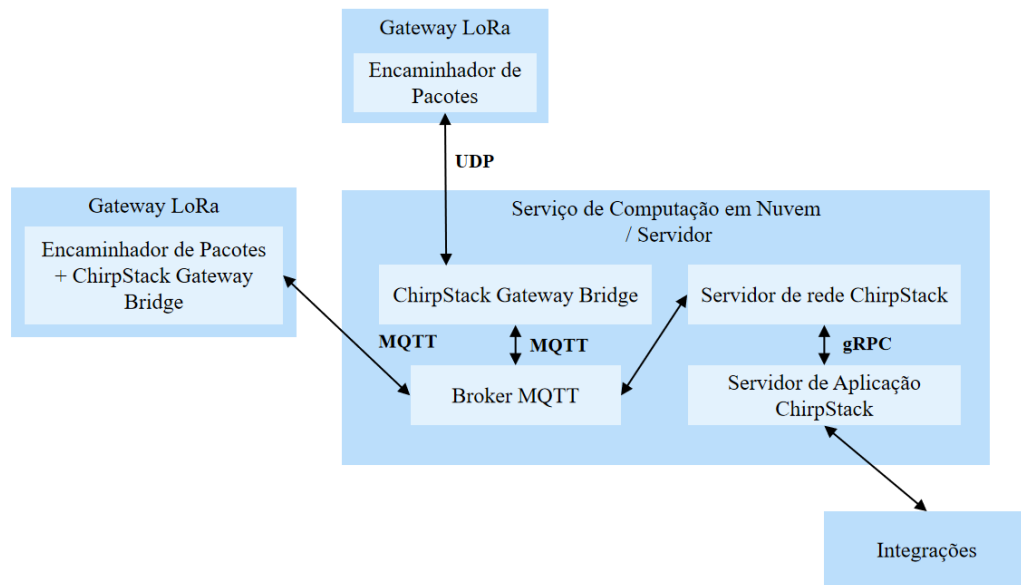
Fonte: Adaptado de Robyns. et al. (2018).

3.4 PLATAFORMAS DE SERVIDOR LORAWAN

Nesta seção, são apresentadas duas destacadas plataformas que fornecem a possibilidade de utilização ou instalação de um servidor LoRaWAN.

3.4.1 *ChirpStack*

O servidor *ChirpStack* consiste em um projeto de código aberto que fornece uma solução de servidor LoRaWAN, incluindo a possibilidade de integração com aplicações e serviços externos. A plataforma pode ser instalada em um servidor de rede local ou em serviço de computação em nuvem. As principais funcionalidades referentes às atualizações das especificações do protocolo LoRaWAN estão presentes no servidor. Sua arquitetura é ilustrada na Figura 13. O *Broker* exerce uma função central no tráfego de dados entre os *gateways* e o servidor, devido à utilização do protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), que em tradução para a língua portuguesa corresponde a Transporte Telemétrico de Mensagens Enfileiradas. Observa-se que o principal componente instalado no *gateway* é o encaminhador de pacotes. Existem duas possibilidades de comunicação entre o Servidor LoRaWAN e o *gateway*: a primeira consiste na utilização do *User Datagram Protocol* (UDP) para prover a comunicação através do *ChirpStack Gateway Bridge*. Na segunda situação, o *gateway* pode se comunicar diretamente com o *Broker*. A comunicação entre o Servidor de Rede e o Servidor de Aplicação é promovida através da ferramenta *Remote Procedure Call* (gRPC). No escopo deste trabalho, o servidor fornecido através do *ChirpStack* constitui uma alternativa para situações onde se requer a instalação de um servidor LoRaWAN local ou privado para avaliação *gateways*, sem que estejam conectados à internet (CHIRPSTACK, s.d.).

Figura 13 – Arquitetura de rede LoRaWAN baseada em *ChirpStack*.

Fonte: Adaptado de ChirpStack (s.d.).

3.4.2 The Things Network

A plataforma *The Things Network* (TTN) é um sistema orientado a fornecer soluções para a Internet das Coisas com a utilização do protocolo LoRaWAN. Os serviços oferecidos incluem a manutenção de redes públicas LoRaWAN, que funcionam de maneira global. Isso permite que o usuário conecte o seu *gateway* em uma rede, e passe a receber no servidor TTN os dados de um nó sensor cadastrado. O sistema possibilita ainda a integração com outras plataformas – aplicações –, que podem ser utilizadas para manipular e gerenciar os dados provenientes dos sensores. O TTN disponibiliza um ambiente virtual para interação entre os desenvolvedores, proporcionando um meio colaborativo (TTN, 2022).

3.5 GATEWAYS LORAWAN

Os *gateways*, de maneira geral, são dispositivos que funcionam como interface entre dois protocolos de rede. Mas, na LoRaWAN, sua função é ainda mais integrada ao sistema, pois, além de fazer a ponte entre a camada física e o serviço da rede LoRaWAN, o dispositivo também possui mecanismos que tornam a transmissão mais eficiente, sobretudo do ponto de vista energético. Sua principal função é encaminhar os pacotes de dados entre nós sensores e servidor da rede, conforme visto na Figura 10. As mensagens enviadas pelo dispositivo são encaminhadas através de todos os *gateways* que estiverem ao seu alcance. O servidor de rede corrige possíveis duplicações e seleciona o *gateway* mais adequado para realização do *downlink* (TTN, 2022).

Cada *gateway* possui capacidade de conectar-se com centenas ou milhares de dispositivos, a depender da quantidade de mensagens transmitidas diariamente. Há uma grande variedade de fabricantes de *gateway* LoRaWAN no mercado, porém, os circuitos integrados de processamento do sinal LoRaWAN possuem tecnologia proprietária. São elementos fundamentais dos *gateways* LoRaWAN dois tipos de Circuitos Integrados (CIs) dedicados à comunicação baseada no padrão, o CI concentrador LoRaWAN e o CI de radiofrequência. O concentrador realiza o processamento das conversões e o efetivo encaminhamento de pacotes. O CI de radiofrequência, que trata da modulação LoRa, é chamado de *Front End RF* (PETRARIU; LAVRIC; COCA, 2019).

Neste trabalho, foram utilizados dois modelos de *gateways* LoRaWAN, a saber:

- RAK2287 da fabricante RAKwireless Technology Limited; e o
- RHF2S008, um *gateway* industrial da fabricante RisingHF.

O *gateway* RAK2287 consiste de uma placa, como ilustrada na Figura 14, e seu funcionamento depende de um sistema externo que deve processar o encaminhamento de pacotes para o serviço em nuvem (RAKWIRELESS, 2021).

Figura 14 – Imagem de *gateway* LoRaWAN baseado em RAK2287.

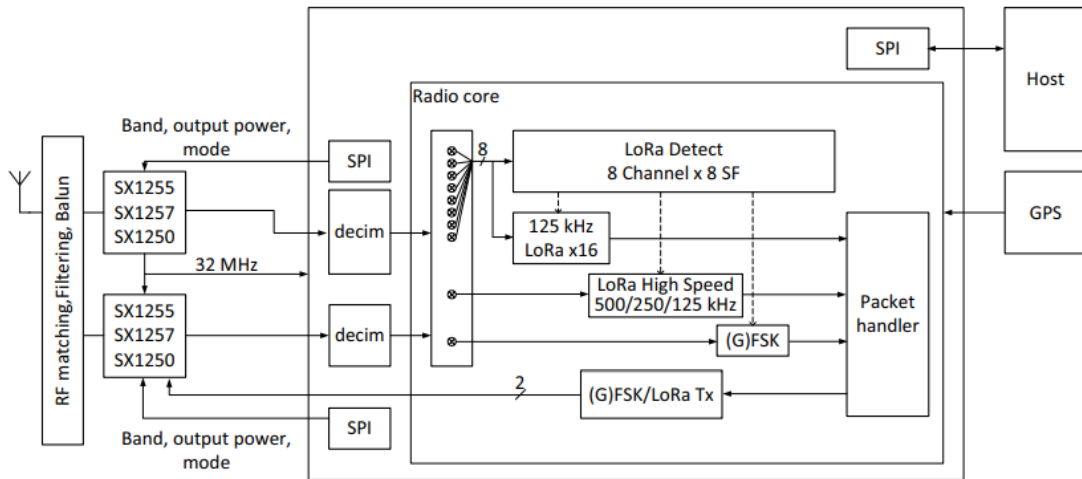


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para compor um *gateway* LoRaWAN, o RAK2287 precisa ser conectado a um processador externo, em geral, uma Raspberry Pi por meio do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI). A Raspberry Pi é utilizada para processar os dados recebidos pelo RAK2287 e encaminhar para o servidor. No sistema operacional da Raspberry Pi, baseado em Linux, são instaladas as aplicações fornecidas pelo fabricante do rádio e os arquivos de configuração da transmissão de dados. A estrutura do RAK2287 possui dois CIs principais dedicados à comunicação baseada no padrão LoRa: SX1302 e SX1250. O circuito integrado SX1302, produzido pela Semtech, é um processador concentrador de *gateway* LoRa, que opera na

detecção e demodulação consistente dos pacotes de dados LoRa (SEMTECH, 2020b). Um diagrama de blocos do SX1302 é apresentado na Figura 15.

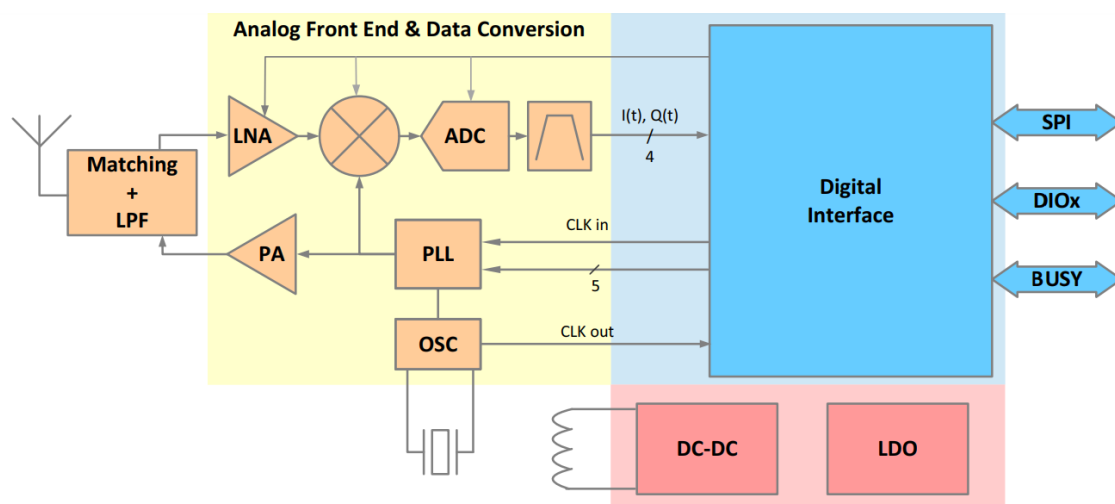
Figura 15 – Diagrama de blocos do *chip* SX1302.



Fonte: Semtech (2020b).

O CI SX1250, também fabricado pela Semtech, é denominado como um *Front End RF*, podendo ser compreendido como um CI de rádio LoRa, foi desenvolvido para funcionar em conjunto com o SX1302 (SEMTECH, 2019b). Na Figura 16 é mostrado o diagrama de blocos que representa a estrutura do circuito integrado SX1250. Um circuito (*Matching*) promove a sintonização do sinal. O *Low-Noise Amplifier* (LNA) é o amplificador otimizado para reduzir o nível de ruído do sinal de entrada. Após passar por filtros e amplificação, o sinal recebido é convertido para um sinal digital. A conversão é feita através de dois elementos dispostos em série, um ADC e um modulador $\Delta\Sigma$. O *phase-locked loop* (PLL) é um sistema em malha fechada que executa o controle da frequência do sinal de saída, de acordo com a oscilação do sinal de entrada. O circuito *Power Amplifier* (PA) promove a amplificação do sinal de saída. O controle de potência de alimentação é promovido por um conversor de corrente contínua (DC-DC) em conjunto com um circuito regulador de tensão, o *Low-Dropout Regulator* (LDO).

O *gateway* LoRaWAN RHF2S008 é um modelo industrial fabricado pela empresa RisingHF. Sua estrutura de funcionamento é semelhante ao *gateway* baseado em RAK2287. A principal diferença é o processador de *gateway* LoRa utilizado, o *chip* SX1301 (uma versão anterior do SX1302). Na Figura 17 é mostrado o *gateway* LoRaWAN RHF2S008.

Figura 16 – Diagrama de blocos do *chip* SX1250.

Fonte: (SEMTECH, 2019b).

Figura 17 – Gateway industrial RisingHF RHF2S008.



Fonte: Foto tirado pelo autor.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentado o conjunto de ferramentas e procedimentos relacionados à concepção, desenvolvimento e validação da plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN proposta neste trabalho. Na primeira seção, são tratadas informações técnicas dos equipamentos e *softwares* utilizados. Como estratégia metodológica, partiu-se de uma análise do sinal LoRa, recebido pelo SDR, permitindo compreender as características e propriedades da camada física da rede, que são apresentadas na segunda seção. Por fim, são apresentadas as etapas de desenvolvimento da plataforma, e descritos os testes realizados.

4.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

O ambiente de desenvolvimento utilizado é constituído de *softwares* e *hardwares* integrados, que são empregados na recepção e transmissão de sinais de rádio LoRa.

4.1.1 Rádio Definido por Software

O Rádio Definido por Software (SDR) é definido por Garg (2007) como um sistema de comunicação de rádio que usa software para o processo de modulação e demodulação de sinais de rádio. Em 2009, foi apresentada uma nova definição pela União Internacional de Telecomunicações - Setor de Radiocomunicações (URIBE; GUILLEN; CARDOSO, 2021), que definiu um SDR como: “Um transmissor e/ou receptor de rádio que utiliza uma tecnologia em que os parâmetros operacionais de RF, como largura de banda, tipo de modulação e potência de saída, sejam definidos ou alterados por software. Excluindo as alterações nos parâmetros operacionais que ocorram durante a operação normal previamente instalada e predeterminada de um rádio de acordo com uma especificação ou padrão do sistema”.

O primeiro SDR foi desenvolvido em 1992. O dispositivo proporciona a realização de diversos ensaios, constituindo uma importante ferramenta no estudo e desenvolvimento de soluções para a área de radiofrequência, sobretudo na modulação e demodulação de sinais. Sua utilização está ligada às possibilidades diversas de modulação em um único dispositivo, flexível reconfiguração do sistema e utilização simultânea de múltiplos canais (BOSE, 1999).

O funcionamento de um SDR parte da conversão de sinais analógicos de rádio em sinais digitais, que podem ser manipulados e processados computacionalmente. Permitindo também, que um sinal digital possa ser convertido para um sinal analógico, e posteriormente transmitido. Os principais parâmetros relacionados ao SDR são: capacidade do conversor digital-analógico (*Digital-to-Analog Converter* - DAC), capacidade do conversor analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter* - ADC), largura de banda, taxa de amostragem e

capacidade de transmissão, recepção e processamento de sinais. Uma importante plataforma de SDR é a *Universal Software Radio Peripheral* (USRP), da Ettus Research. A empresa, que foi criada em 2004, apresenta ampla variedade de modelos de SDR (URIBE; GUILLEN; CARDOSO, 2021).

Para este trabalho, foi utilizado o SDR de modelo USRP-2922, da National Instruments, que opera no espectro de 400 MHz até 4,4 GHz e possui uma largura de banda de 20 MHz. Sua comunicação com o computador é através de uma conexão *Gigabit Ethernet*. O dispositivo é adequado para modulação de sinais na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que é a faixa não licenciada utilizada pela rede LoRaWAN. O aparelho é equivalente ao USRP-N210, da Ettus Research (NI, 2022).

4.1.2 Programa computacional

Entre os *softwares* mais utilizados na modulação, demodulação e manipulação de sinais de rádio com a utilização de rádio definido por *software*, estão o GNU Radio, o Matlab e o LabView (AKEELA; DEZFOULI, 2018). Para a realização deste trabalho, foi feita integração do SDR com LabView e MatLab.

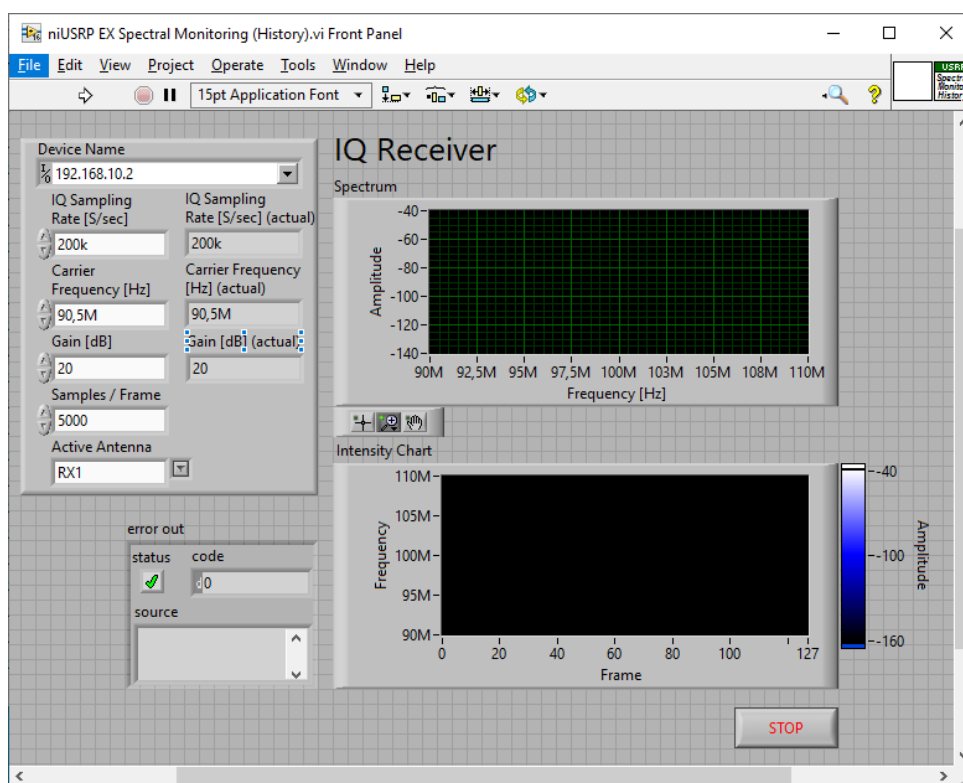
A *National Instruments*, fabricante do SDR de modelo USRP-2922 utilizado neste trabalho, também é detentora do *software* LabView. Destarte, a instituição fornece um conjunto de modelos destinados à análise gráfica de sinais através do programa, para operar de forma integrada ao rádio definido por *software*. O LabView possibilita a criação de *Virtual Instruments* (VIs), que são algoritmos criados em um ambiente de desenvolvimento, orientados a medição, registro, manipulação e análise de dados. São fornecidos, junto ao programa, alguns modelos de VIs destinados à utilização do SDR. Na Figura 18 é mostrada a tela de um modelo que efetua a exposição gráfica do sinal amostrado. Nessa implementação, um das janelas apresenta o gráfico do sinal no domínio da frequência, e outra apresenta o seu espectrograma de frequência.

Na Figura 19 é apresentado um modelo fornecido, através do qual é possível gerar o gráfico de constelação de um sinal captado. A relevância dessa análise gráfica é dada pela utilização da modulação IQ, utilizada pelos rádios LoRa.

A conexão com o MatLab ocorre por meio de um pacote disponibilizado pela proprietária da marca, denominado *Communications Toolbox Support Package for USRP Radio*. Dessa forma, o programa pode ser utilizado para análise e estudo do sinais de rádio transmitidos em uma rede LoRaWAN.

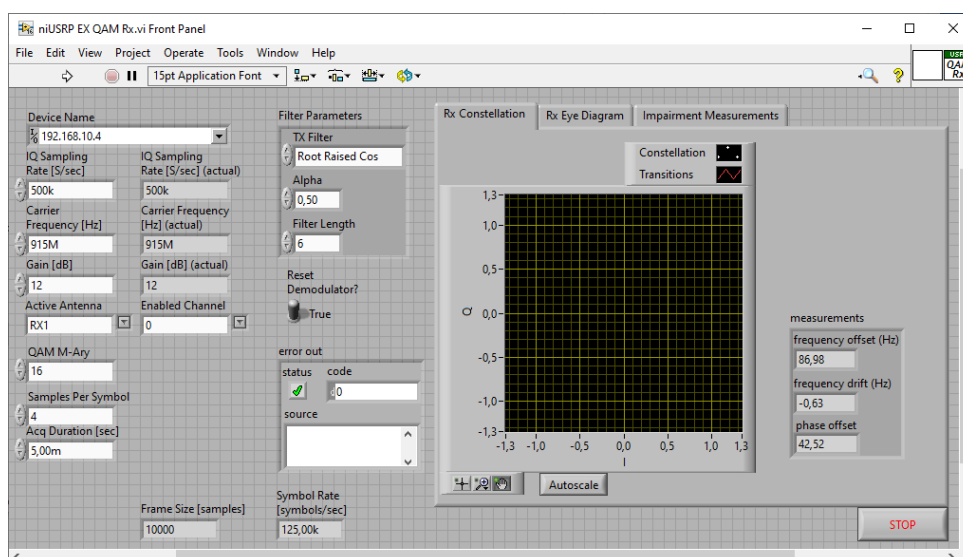
Um implementação, realizada no Matlab, é apresentada no Apêndice A. Na imagem consta o código utilizado para aquisição e manipulação de dados com a utilização do Matlab. A partir do comando “findsdr”, é possível obter informações acerca do SDR conectado ao computador. No programa, um objeto associado à variável “radio” contém

Figura 18 – Modelo do LabView destinado ao monitoramento espectral de sinais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Modelo do LabView para gráfico de constelação.



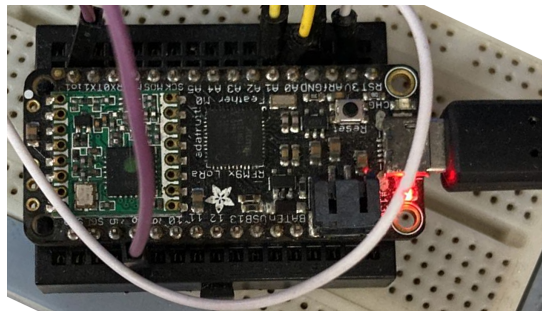
Fonte: Elaborado pelo autor.

os parâmetros utilizados na captação do sinal através do SDR. Os dados obtidos foram armazenados em uma matriz, podendo ser manipulados e plotados para análise dos sinais.

4.1.3 Dispositivos utilizados e compatíveis com LoRaWAN

Para a geração de sinais LoRa, foram utilizados dois dispositivos baseados em placas de desenvolvimento eletrônico contendo processador e rádio LoRa. Um dos dispositivos é baseado na placa Feather M0, fabricado pela Adafruit, mostrado na Figura 20. Com esta placa foi desenvolvido um nó sensor LoRa em que é possível enviar dados a um servidor LoRaWAN em nuvem, hospedado na plataforma TTN. O equipamento é provido do módulo integrado transceptor LoRa RF96.

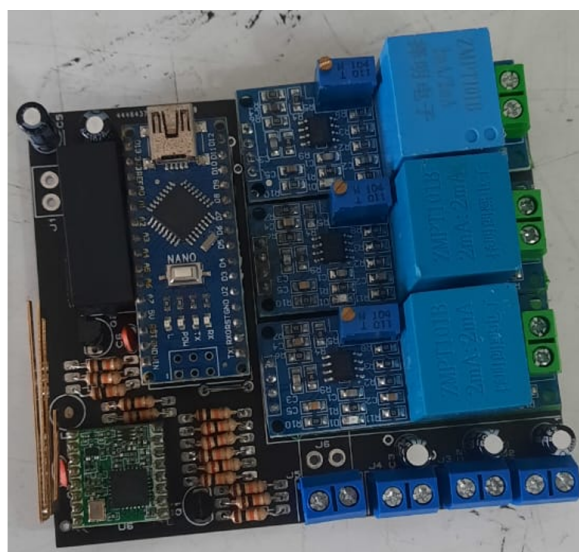
Figura 20 – Placa de desenvolvimento Feather M0.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No outro dispositivo, composto de um microcontrolador MEGA328P e um transceptor LoRa SX1276, ilustrado na Figura 21, foi programado para enviar uma mensagem conhecida, utilizando a modulação LoRa.

Figura 21 – Placa de desenvolvimento baseada em MEGA328P.



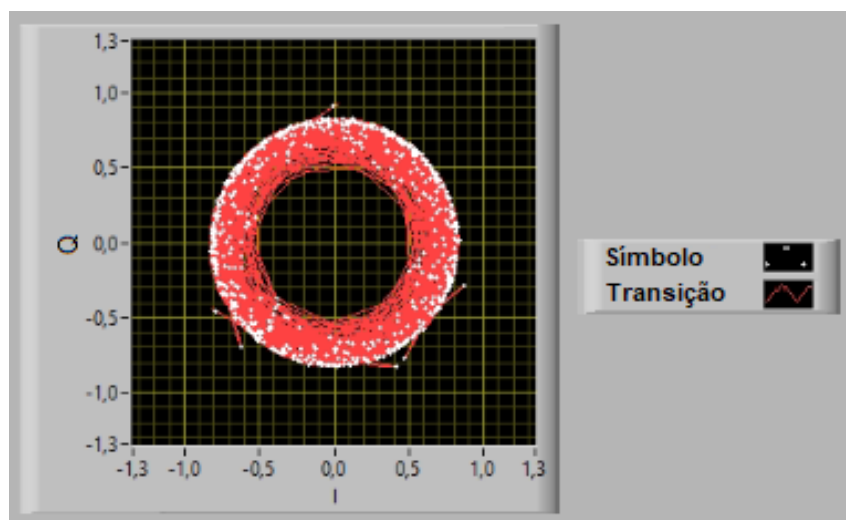
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 ANÁLISE DE SINAIS LORA

Foi realizado um ensaio para análise de sinais LoRa, com a utilização dos dois dispositivos descritos na seção anterior. As placas foram programadas para efetuar transmissão de dados conhecidos via modulação LoRa, enquanto o SDR foi aplicado na recepção dos sinais. Um dos dispositivos foi interconectado a uma rede LoRaWAN. O segundo dispositivo foi programado para enviar uma mensagem de forma cíclica, utilizando somente a modulação LoRa. Dentro do alcance do SDR, também permaneceram operacionais os *gateways* RAK2287 e RHF2s008.

Na Figura 22 é ilustrado o sinal LoRa obtido na captação de dados experimental através de um gráfico de constelação. Nessa representação, os dados normalizados do sinal obtido caracterizam as suas amplitude e fase. A transmissão via LoRa utiliza a modulação IQ, que utiliza-se de uma representação numérica complexa do sinal, que é formado de duas componentes. A parte real é denominada *In phase*, que significa Em fase, na língua portuguesa, e é representada pela letra I. A componente imaginária é denominada *Quadrature* (em quadratura), e é representada pela letra Q.

Figura 22 – Sinal experimental LoRa em gráfico de constelação.

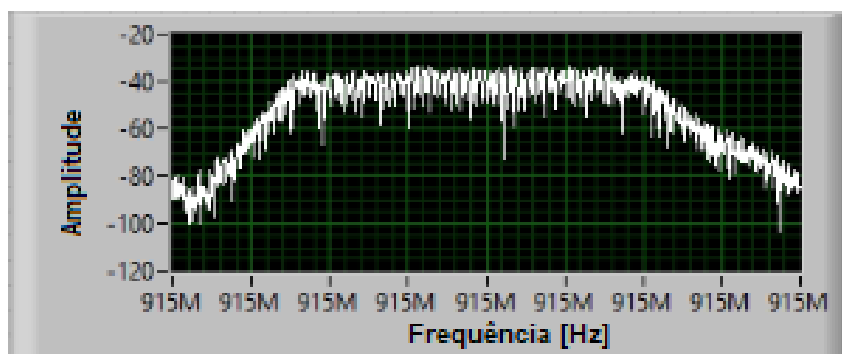


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 23 tem-se uma representação do sinal LoRa no domínio da frequência obtido de maneira experimental. Na Figura 24 é apresentado o gráfico obtido a partir da análise espectral de frequências do sinal LoRa interceptado. É observada a semelhança com a ilustração da Figura 8.

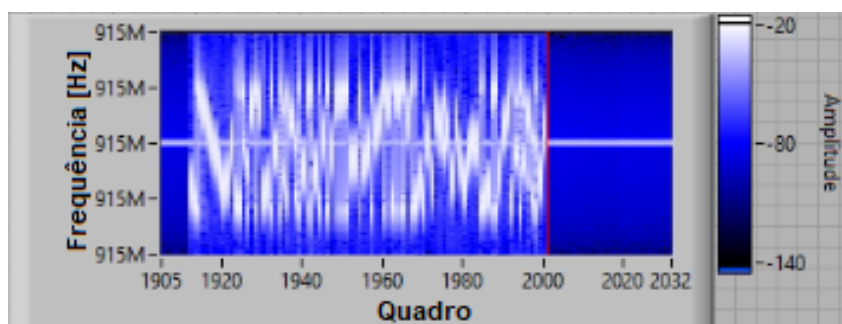
A representação do sinal LoRa interceptado, também é apresentada na Figura 25. Esse gráfico contém duas curvas, pois apresenta as duas componentes do sinal transmitido utilizando a modulação IQ. Observa-se a defasagem angular de 90 graus entre os sinais.

Figura 23 – Gráfico de sinal experimental LoRa no domínio da frequência.



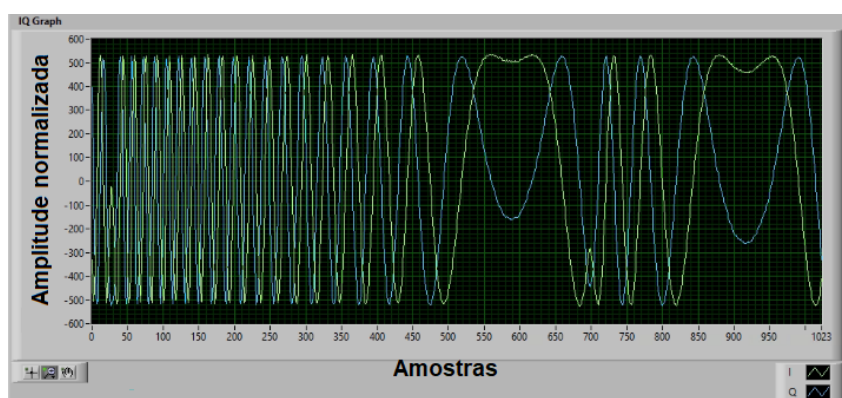
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Espectrograma de frequência de sinal experimental LoRa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

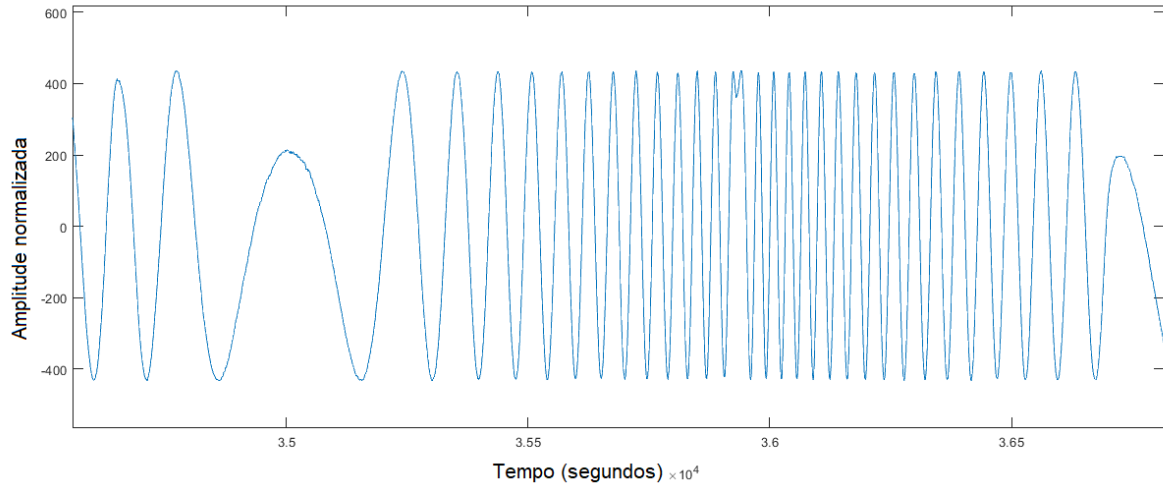
Figura 25 – Gráfico de sinal experimental LoRa no domínio do tempo obtido através do LabView.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 26 é apresentado o gráfico do sinal LoRa no domínio do tempo, com a utilização do SDR integrado ao MatLab. A imagem apresenta os *chirps* que contêm as informações transmitidas pelos dispositivos.

Figura 26 – Gráfico de sinal experimental LoRa no domínio do tempo obtido através do Matlab.

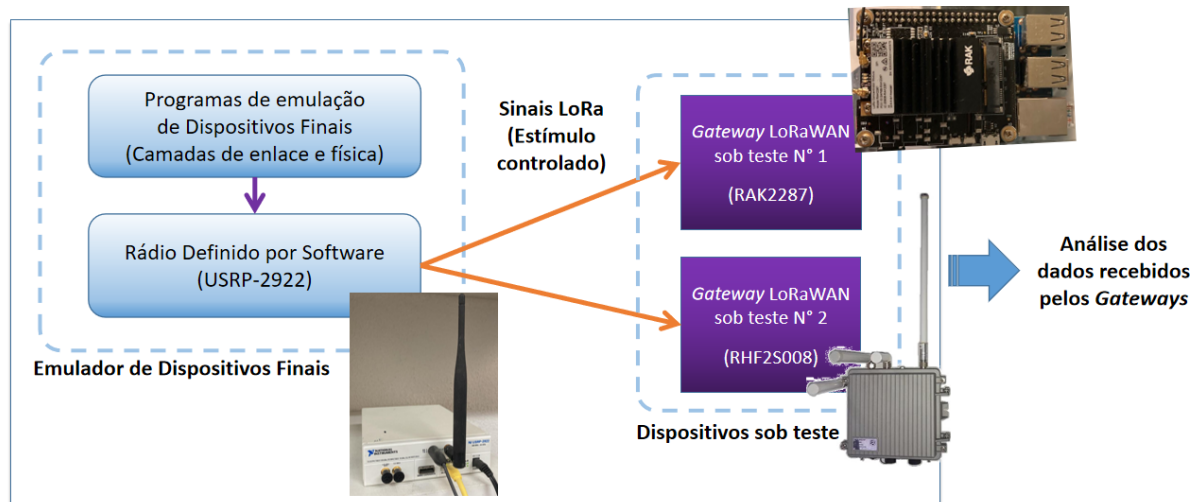


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA DE TESTE DE *GATEWAY* LORAWAN PROPOSTA

A implementação da plataforma de teste proposta e descrita neste trabalho foi baseada no propósito de analisar o desempenho de *gateways* em diferentes cenários, considerando as situações que podem ocorrer na aplicação prática da tecnologia LoRaWAN. A solução consiste em um sistema capaz de emular por SDR vários dispositivos finais em uma rede LoRaWAN. A transmissão de sinais com diferentes valores de parâmetros, por exemplo, níveis de ruído, frequência e potência, permite verificar o desempenho do *gateway* sob teste (*Gateway Under Test* - GUT) em diversas condições de sinais recebidos. Na realização dos experimentos, foram utilizados dois *gateways* LoRaWAN de modelos diferentes, de forma a permitir o estudo comparativo dos resultados obtidos. Na Figura 27 é ilustrada a estrutura da plataforma.

O Emulador de dispositivos finais é baseado em SDR e deve gerar estímulos controlados, que devem provocar respostas dos GUTs. O desempenho da plataforma de teste depende, principalmente, da qualidade dos estímulos, que devem apresentar a maior similaridade possível com os sinais gerados em uma situação real. Em uma rede LoRaWAN, devido às suas características e especificações, um dispositivo final transmite informações para um *gateway* a dezenas de metros de distância. Por outro lado, um dispositivo final a quilômetros de distância, pode transmitir com sucesso dados para o mesmo *gateway*. Além disso, as especificações LoRaWAN tornam o processo otimizado, de forma que a mensagem do dispositivo final mais próximo seja enviada mais rapidamente e com menor consumo de energia. Os parâmetros que mais influenciam, considerando essa relação entre distância e consumo, são o fator de espalhamento e a potência do sinal. Por sua vez, o

Figura 27 – Esquema da plataforma de teste de *gateway* LoRaWAN.

Fonte: Elaborado pelo autor.

controle adaptativo de taxa de dados (*Adaptive Data Rate* - ADR) é um mecanismo que possui a função de ajuste automático desses parâmetros. Entretanto, essa ferramenta possui limitações que podem ocasionar perdas de pacotes e maior consumo de energia dos dispositivos finais (COUTAUD; HEUSSE; TOURANCHEAU, 2021).

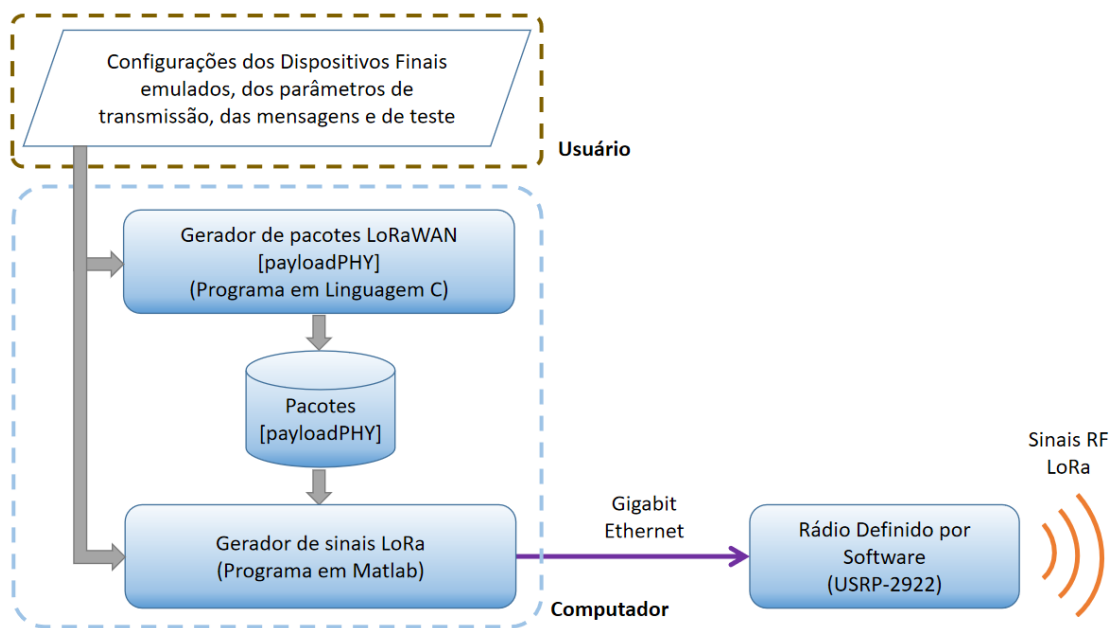
Além disso, a operação de um *gateway* LoRaWAN pode sofrer influência de fatores físicos, que podem interferir no adequado funcionamento do elemento de rede (ANZUM, 2021). Os resultados comparativos, provenientes da realização de testes de diferentes modelos de *gateways* LoRaWAN, também explicitará o grau de importância que aspectos específicos relativos às particularidades de cada equipamento podem ocasionar. São alguns exemplos de características construtivas que podem influenciar sobre a operação de *gateways* LoRaWAN: os CIs LoRaWAN utilizados, a blindagem contra efeitos eletromagnéticos e a configuração dos seus circuitos eletrônicos (SNEHA et al., 2022).

Um fator de alta relevância, inerente ao desempenho de *gateways* LoRaWAN, é a capacidade de recepção de sinais mediante possíveis interferências. Grande parte das aplicações de Internet das Coisas requer elevada eficiência energética dos dispositivos finais, sobretudo, aqueles instalados em posições distantes e de difícil acesso, como em uma floresta. Quanto maior a capacidade de recepção de sinais de um *gateway* LoRaWAN, menor será o consumo de energia do dispositivo final para a transmissão de uma mensagem; uma vez que esse consumo pode ser otimizado, com a redução da potência do sinal transmitido, e utilização de valores de parâmetros que requeiram menor consumo de energia, como o Fator de Espalhamento. Isto é, a utilização de *gateways* com melhor capacidade de recepção de sinais, pode proporcionar uma rede mais eficiente, do ponto de vista de consumo energético dos dispositivos finais.

4.3.1 Emulador de dispositivos finais (*end devices*)

O Emulador de dispositivos finais consiste em um conjunto de *hardware* e *software* que executa a construção dos pacotes de dados de acordo com as especificações do protocolo LoRaWAN, e então, são codificados e transmitidos através da modulação LoRa, conforme ilustração do encapsulamento de dados na Figura 11. O Emulador é composto de um programa Gerador de pacotes LoRaWAN, um banco de dados de pacotes, um Gerador de sinais LoRa e um Rádio Definido por *Software*, conforme é apresentado através da Figura 28.

Figura 28 – Esquema do Emulador de dispositivos finais LoRaWAN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A geração de pacotes LoRaWAN está relacionada à estrutura de pacotes de dados LoRaWAN, que é promovida a partir da concatenação das informações relativas à cada campo do pacote. Além disso, dois procedimentos criptográficos são aplicados na montagem de cada pacote, com o objetivo de garantir integridade e segurança à transmissão dos dados, conforme detalhado na Seção 3.3.

O Gerador de pacotes LoRaWAN é um programa desenvolvido em linguagem C++, cuja interface é ilustrada na Figura 29, que recebe como entrada do usuário os dados referentes aos dispositivos finais emulados e mensagens a serem enviadas. Sua implementação foi baseada na biblioteca para sistemas embarcados TinyLora, fornecida pela Adafruit. As informações de entrada do programa (inseridas pelo usuário) são as seguintes: endereço do dispositivo, tamanho da mensagem e número de pacotes criados. Nesse programa, as chaves criptográficas utilizadas na rede são fixas e podem ser modificadas

apenas com alterações e recompilação do código-fonte. A partir da inserção dos dados, é gerado um arquivo com a lista de pacotes criados, em ordem sequencial de envio, de acordo com contagem estabelecida pelas especificações LoRaWAN. A partir da execução do Gerador de pacotes, com diferentes endereçamentos e características de mensagens, é estabelecido um banco de dados, com pacotes LoRaWAN de diferentes dispositivos finais emulados.

Figura 29 – Interface do programa Gerador de pacotes LoRaWAN.

```

-----
Universidade Federal da Paraíba
Gerador de Pacotes LoRaWAN
Trabalho de Dissertacao de Joao Paulo Silvino Belo da Silva
Orientador: Prof. Dr. Cleonilson Protasio de Souza
-----

Parametros do Dispositivo Final:
DevAddr[4] = |DevAd[0]|DevAd[1]|DevAd[2]|DevAd[3]|
AppSKKey[16] = |AppSK[0]|AppSK[1]| .... |AppSK[14]|AppSK[15]|
NwkSKKey[16] = |NwkSK[0]|NwkSK[1]| .... |NwkSK[14]|NwkSK[15]|

* Os valores de AppSKKey e NwkSKKey sao fixos neste programa. Para altera-los, e necessario modificar o codigo fonte.
AppSKKey[16] = {0x8F, 0x88, 0xE1, 0xE4, 0x7C, 0xB5, 0x29, 0xCA, 0xA2, 0x51, 0xDC, 0x13, 0x82, 0xB4, 0x69, 0x77} (MSB)
NwkSKKey[16] = {0x07, 0x6E, 0x5A, 0x88, 0xF4, 0xB4, 0x66, 0x29, 0x2B, 0x36, 0xCF, 0xE1, 0x56, 0xFE, 0xB9, 0xF4} (MSB)

Insira os dados de endereco do dispositivo (bytes em formato decimal [0-255]).
Os bytes mais significativos primeiro (MSB):
DevAd[0]:

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gerador de sinais LoRa consiste em um programa desenvolvido em Matlab, que importa do banco de dados os pacotes LoRaWAN de diferentes dispositivos finais emulados, e os transmite com a utilização do Rádio Definido por *Software*.

Através do Gerador de sinais LoRa é possível transmitir sinais de vários dispositivos finais emulados, com os diferentes endereços. Apesar da possibilidade do emprego de um maior número de dispositivos, neste trabalho, esse número foi limitado a oito, devido à utilização dos oito canais disponibilizados pelos *gateways*. Os canais indicam a frequência da portadora do sinal, que é uma característica do protocolo para diminuir a probabilidade de interferência entre sinais. Dessa forma, a diminuição do intervalo entre as transmissões de sinais pelos dispositivos finais emulados é equivalente a um aumento no número de dispositivos na rede.

As especificações LoRaWAN determinam a banda, de acordo com parâmetros regionais. Também são previstos no padrão os valores de frequências utilizadas em cada canal, que são as sub-bandas. No Brasil, a Anatel determinou o uso da banda AU915-928, cujas frequências especificadas para *uplink* são 916,8 MHz, 917 MHz, 917,2 MHz, 917,6

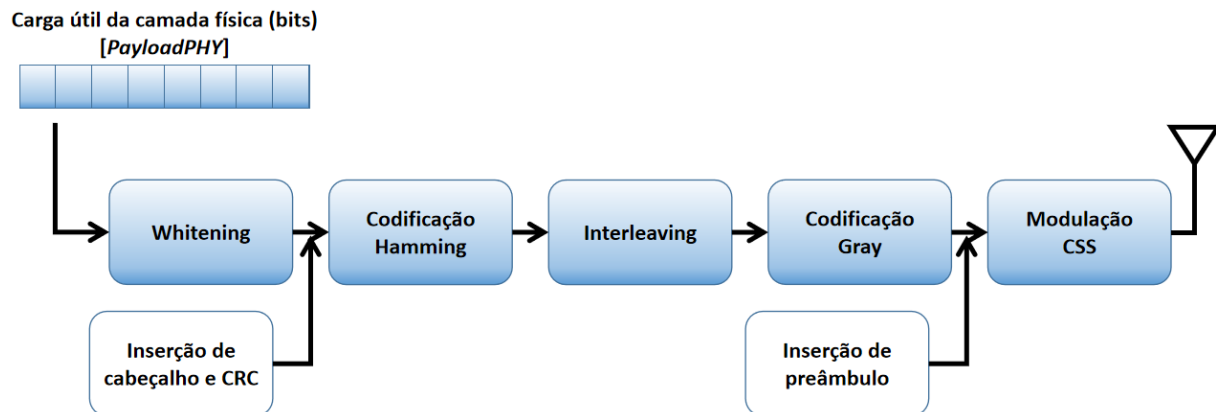
MHz, 917,8 MHz, 918 MHz, 918,2 MHz e 917,5 MHz. Dessa forma, para explorar uma maior utilização do canal, pode-se reduzir o intervalo de transmissão de dados em uma mesma frequência (sub-banda). Ressalta-se, contudo, que o SDR utilizado neste trabalho possui apenas um canal de transmissão de sinais. Dessa forma, para qualquer número de dispositivos finais emulados, os sinais não são transmitidos simultaneamente. A fim de proporcionar a utilização de todos os canais, o programa pode gerar sinais de vários dispositivos finais emulados, em diferentes canais.

Outros importantes parâmetros configuráveis do Gerador de sinais LoRaWAN e que podem ser ajustados a cada ciclo de teste são: número de mensagens enviadas, tamanho da mensagem e intervalo entre envio de mensagens. Além disso, a ferramenta apresenta dois importantes complementos para a criação dos diferentes cenários propostos pela plataforma de teste. O primeiro complemento refere-se ao ajuste de ganho de sinal transmitido pelo SDR. O equipamento permite a aplicação de um ganho de potência ao sinal transmitido de até 31 dB, sendo que a sua potência de saída varia entre 17 dBm e 20 dBm. O segundo mecanismo complementar proposto é a adição de ruído ao sinal, que foi realizada com a utilização da função *awgn* do Matlab, usada para a adição de ruído gaussiano branco ao sinal. Mas, essa operação é feita com base na potência do sinal de forma que seja possível ajustar o valor da relação sinal-ruído (SNR).

A modulação LoRa, isto é, os processos relativos à camada física do protocolo LoraWAN (LoRaPHY) envolvem um conjunto de tecnologias patenteadas pela empresa Semtech, que são aplicadas aos *chips* transceptores. Entretanto, um estudo, realizado por Tapparel et al. (2020), demonstrou a cadeia de codificação e modulação da camada física LoRaPHY, que consiste em um conjunto de etapas de transformação, codificação e manipulação de dados, que ocorrem anteriormente à modulação do sinal. Esses estágios são representados a partir da cadeia de blocos ilustrada na Figura 30. A estrutura foi desenvolvida com base na realização de um procedimento de engenharia reversa promovido por meio do uso de um transceptor LoRa RFM95W, fabricado pela Semtech.

De acordo com Tapparel et al. (2020), o processo denominado *Whitening* consiste em uma transformação, cuja finalidade é eliminar a componente contínua dos dados. Essa etapa consiste em uma transformação realizada a partir de uma operação lógica XOR (ou exclusivo) entre os dados binários e uma sequência pseudo-aleatória. Na codificação Hamming ocorre o incremento de bits de paridade, a fim de promover a correção de erros pela adição de uma condição de redundância. O número de bits incrementados depende da taxa de código (CR). O protocolo LoRaPHY possui quatro possibilidades de CR: 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8, que corresponde, respectivamente, a 1, 2, 3 e 4 bits de paridade, a cada 4 bits contendo dados. Através da técnica *Interleaving*, é promovido o entrelaçamento dos dados binários, de forma a distribuir um conjunto de bits sequenciais em múltiplos símbolos. Dessa forma, a utilização desse método ocasiona um aumento de latência. Entretanto,

Figura 30 – Estrutura em cadeia de codificação e modulação da camada física LoRaPHY.



Fonte: Adaptado de Tapparel et al. (2020).

consiste em uma solução eficaz para proporcionar uma eficiente correção de erro. Na codificação Gray é feito um mapeamento da correspondência entre os dados binários e os símbolos, de forma que a cada conjunto de bits transmitidos, seja alterado apenas um bit por vez. Portanto, a aplicação desses procedimentos, em cadeia, visa promover a verificação e correção de erros, a fim de proporcionar uma transmissão da mensagem com elevada probabilidade de integridade e segurança. Por fim, é realizada a modulação do sinal, que consiste na conversão dos símbolos binários em sinais de rádio no padrão LoRa (*chirps*). De forma que, o número de bits por símbolo corresponde ao valor de SF.

Xu et al. (2022) realizaram uma implementação da LoRaPHY e analisaram o seu desempenho, comparando com outras aplicações focadas no desenvolvimento de moduladores e demoduladores LoRa. De acordo com as métricas apresentadas, a solução destaca-se por ser mais completa e apresentar elevado desempenho. Além disso, é fornecida uma versão do algoritmo em Matlab, que contempla a codificação, modulação, decodificação e demodulação de camada física LoRa. A solução proposta por Xu et al. (2022) foi utilizada neste trabalho para compor o Gerador de sinais LoRa, sendo aplicada na codificação e modulação do sinal LoRa (LoRaPHY).

4.3.2 Coleta e Análise de Pacotes

Um sistema de coleta e análise de pacotes foi implementado com a finalidade de registrar os pacotes recebidos para avaliação de resultados dos testes de *gateways*. O Emulador de dispositivos finais transmite sinais LoRa, que são recebidos pelos *gateways*, e os pacotes são encaminhados para o servidor LoRaWAN, conforme operação normal da rede. Durante a realização dos testes, o Gerador de sinais LoRa gera um arquivo com o registro de início e término do ciclo de realização do teste, constando data e hora desses eventos. Com isso, os pacotes recebidos no servidor LoRaWAN, com data e hora

de recebimento pelo *gateway*, são encaminhados através do sistema de coleta e análise de pacotes e, após, são armazenados. Dessa forma, é possível obter o registro dos pacotes foram recebidos pelo *gateway* e encaminhados ao servidor LoRaWAN.

A plataforma TTN, que disponibiliza o servidor LoRaWAN utilizado neste trabalho, possui diversos processos de integração com outros serviços externos, inclusive através do protocolo MQTT. Este protocolo foi construído com foco na comunicação entre máquinas, e suas principais características são a baixa utilização de banda, segurança, simples implementação e a baixa necessidade de processamento pelos dispositivos.

A estrutura do padrão MQTT é baseada em *brokers*, que são sistemas destinados ao gerenciamento da comunicação, e clientes, que são os dispositivos conectados ao *broker*. A comunicação é baseada em tópicos, que são expressões utilizadas para organizar o encaminhamento das mensagens pelo *broker*. São dois os tipos de clientes: o *publisher*, que envia as mensagens para o *broker* através da publicação das mensagens em tópicos, e o *subscriber*, que recebe as mensagens publicadas no tópico. Para receber as mensagens publicadas em um tópico, deve ser realizada pelo *subscriber* a assinatura no tópico.

Neste trabalho foi criado um cliente MQTT, por meio da ferramenta de desenvolvimento baseada em fluxos Node-RED, para integrar a plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN. Nessa aplicação, representada através da Figura 31, o cliente MQTT se conecta ao *broker* fornecido pela TTN, através do qual são enviadas as mensagens dos dispositivos finais da rede LoRaWAN.

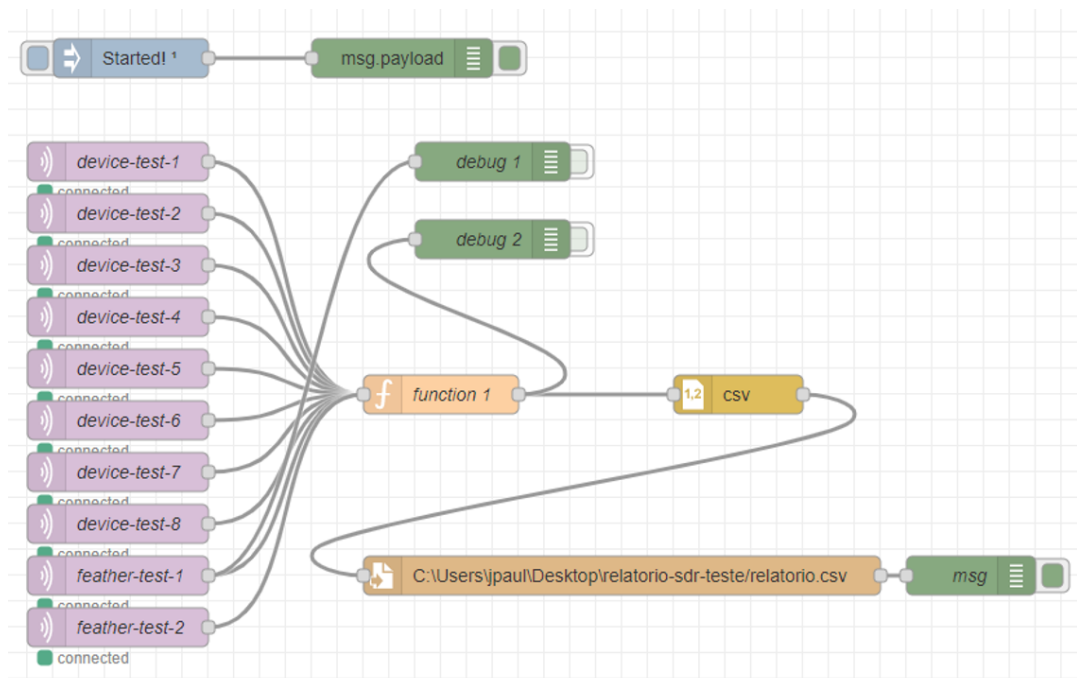
Foi realizada a inscrição em dez tópicos, referentes aos dispositivos finais da rede LoRaWAN utilizada pela plataforma de teste de *gateways*. Além disso, um código, desenvolvido em linguagem de programação JavaScript, foi elaborado para a seleção automática das informações necessárias para a avaliação e análise do desempenho de *gateways* LoRaWAN, por exemplo, hora de recebimento do sinal, SF, largura de banda e frequência da portadora. Os valores de parâmetros relacionados à transmissão da mensagem (metadados) também são encaminhados pelos *gateways*, em conjunto com demais dados, como SNR e RSSI. Os dados são organizados e armazenados em um diretório especificado.

A partir do registro dos parâmetros de teste, com data e hora do início e término, produzido pelo Gerador de Sinais LoRa, os dados obtidos pelo sistema de aquisição durante o teste podem ser mapeados e analisados.

4.3.3 Estrutura da plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN proposta

No diagrama, visto na Figura 32, é apresentada a estrutura completa da plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN. O processo de realização de teste é iniciado com a inserção de dados, pelo usuário, na interface do Gerador de Pacotes LoRaWAN. São inseridos o endereço do dispositivo final emulado, valor correspondente ao tamanho da mensagem e

Figura 31 – Aplicação de aquisição de dados baseada em protocolo MQTT e desenvolvida em Node-RED.



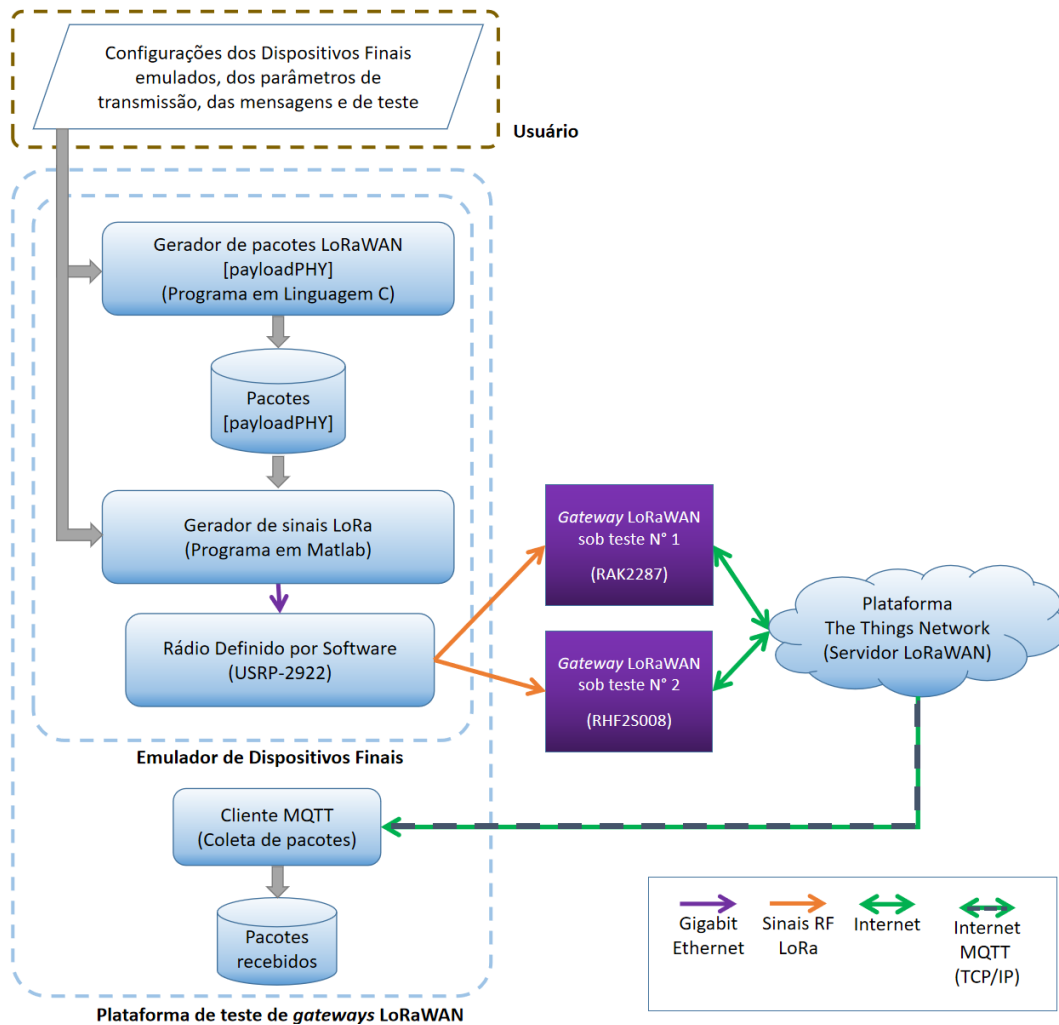
Fonte: Elaborado pelo autor.

número de pacotes a gerar. O processo é repetido para cada dispositivo final emulado. A partir desse processo, é gerado um banco de dados com um conjunto de pacotes LoRaWAN, de diferentes dispositivos finais Emulados.

Os dados de pacotes são importados pelo Gerados de sinais LoRa, onde são configurados os parâmetros de transmissão utilizados no teste: número de dispositivos emulados, quantidade de mensagens, frequência da portadora do sinal, intervalo entre mensagens, tamanho da mensagem, Fator de Espalhamento, largura de banda, taxa de amostragem, taxa de código (CR), habilitação de código de verificação de erro (CRC), tamanho do preâmbulo do sinal, valor de ganho do sinal e nível de ruído – a partir do valor de SNR.

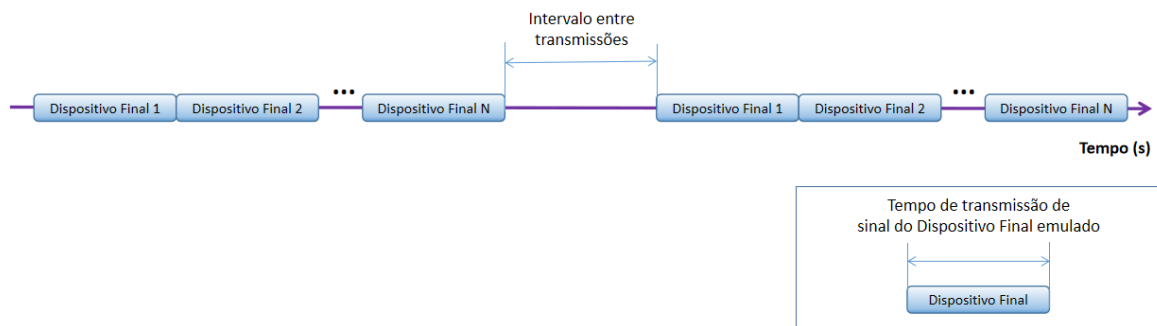
O Emulador de dispositivos finais opera ciclicamente, com intervalo entre envios de mensagens fixo, e definido pelo usuário, conforme é observado através da Figura 33. Na imagem, o número de dispositivos finais é representado pela variável N. O ciclo de operação do programa consiste em transmissões sequenciais das mensagens dos dispositivos finais emulados. O valor da frequência portadora do sinal também é determinada durante a configuração de parâmetros do Gerador de sinais LoRa.

Considerando que a realização de teste de *gateways* tem como foco a análise desses equipamentos em condições normais de operação, os experimentos apresentados neste trabalho foram realizados em ambiente sem isolamento eletromagnética. Além disso, foram

Figura 32 – Estrutura detalhada da plataforma de teste de *gateway* LoRaWAN.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Ciclo de operação do Emulador de dispositivos finais para realização de testes.

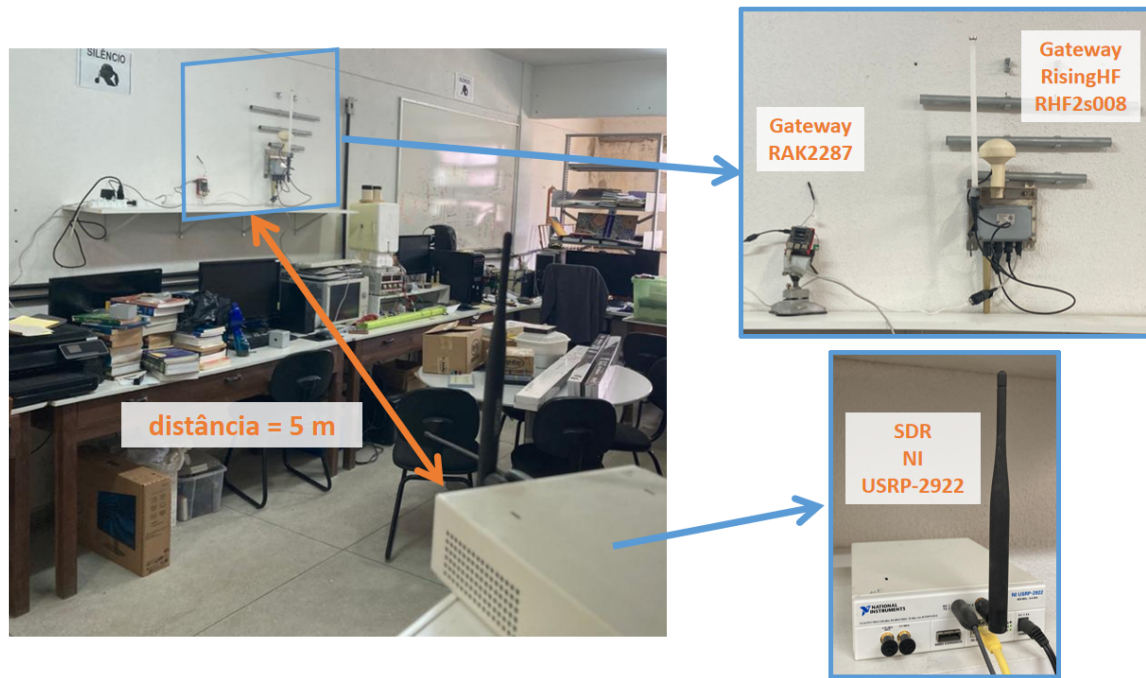


Fonte: Elaborado pelo autor.

realizados testes funcionais, que possibilitaram a avaliação qualitativa e comparativa dos sinais gerados nos testes para analisar o desempenho da plataforma considerando as

condições ambiente. A disposição dos dispositivos no ambiente, durante a realização de testes, é apresentada na Figura 34. A distância entre os *gateways* LoRaWAN sob teste e o SDR é de aproximadamente 5 m.

Figura 34 – Disposição física dos equipamentos durante realização de testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 DESCRIÇÃO DOS TESTES PARAMÉTRICOS

A realização de testes paramétricos teve o objetivo de analisar o desempenho dos *gateways* RAK2287 e RHF2S008 submetidos a sinais com variação de nível de ruído, Fator de Espalhamento e ganho de potência. A escolha desses parâmetros para aplicação experimental é explicada pela relevância que possuem com relação à qualidade da comunicação. Além disso, são fatores que podem ser ajustados no emulador de dispositivos finais. Essas variáveis são ligadas a outros aspectos físicos que envolvem o funcionamento de um rede LoRaWAN, como a distância entre *gateway* e dispositivo final, limitação de consumo de energia e sensibilidade dos *chips* receptores de sinais LoRa. Em um cenário no qual a eficiência energética é um fator crítico, e o dispositivo final é instalado a uma longa distância do *gateway*, o aumento de potência do sinal ou do SF pode melhorar a comunicação, evitando perda de pacotes. Entretanto, esses procedimentos resultam em um maior consumo de energia (REYNDERS; MEERT; POLLIN, 2017). Baixo nível de potência do sinal, ruído e interferências na comunicação podem causar a perda de pacotes. Portanto, a métrica adotada para avaliar as performances dos dispositivos foi a taxa de pacotes entregues (*Packet Delivery Ratio* - PDR), que é estabelecida como a relação entre

o número de pacotes entregues com sucesso e a quantidade de pacotes enviados pelo nó sensor (SAIF et al., 2022).

4.4.1 Análise do sinal gerado pelo Emulador de dispositivos finais

Com a finalidade de analisar o sinal gerado pelo Emulador de dispositivos finais LoRaWAN, foi utilizado um SDR RTL, que é um SDR baseado no circuito integrado RTL2832U, fabricado pela empresa Realtek. O dispositivo, desenvolvido inicialmente para funcionar como um receptor de TV digital, tornou-se amplamente utilizado como SDR. Sua intensa aplicação nesse campo, propiciou o crescimento de comunidades de desenvolvimento de *softwares* de código aberto para dispositivo (STEWART et al., 2015). Para a realização do teste, foi utilizado o *software* SDRSharp, que é uma simples e eficiente aplicação de processamento digital de sinais, baseada em computadores pessoais, para SDR (DANYMOL; AJITHA; GANDHIRAJ, 2013). O experimento, possibilitou a análise de SNR do sinal gerado pelo SDR USRP-2922, no contexto do Emulador de dispositivos finais. Também foi realizada uma avaliação comparativa entre os sinais LoRa gerados pelo SDR USRP-2922 e pela Feather M0. Dada a limitação do SDR RTL, não foi possível garantir a calibração em relação ao nível de potência do sinal, podendo variar entre dispositivos. Mas foi realizada uma avaliação comparativa entre sinais de diferentes fontes. Com disso, foi possível estabelecer o valor de SNR dos sinais.

4.4.2 Teste de sensibilidade ao ruído

Para avaliação de sensibilidade ao ruído dos *gateways* foi adicionado ruído ao sinal gerado pelos dispositivos finais Emulados. O objetivo do teste é examinar e quantificar o nível de ruído incrementado ao sinal necessário para comprometer a transmissão do pacote. Os parâmetros utilizados na realização do experimento estão apresentados na Tabela 1.

Na Figura 35 é ilustrado o sinal LoRa, gerado a partir do Emulador de dispositivos finais, sem adição de ruído.

O gráfico apresentado na Figura 36 apresenta o mesmo sinal da Figura 35 com ruído gaussiano branco. Para acrescentar ruído ao sinal, foi utilizada a função *awgn* do Matlab. Dessa forma, foi possível adicionar ruído ao sinal, com base no valor da sua potência e do SNR definido (MATHWORKS, 2022).

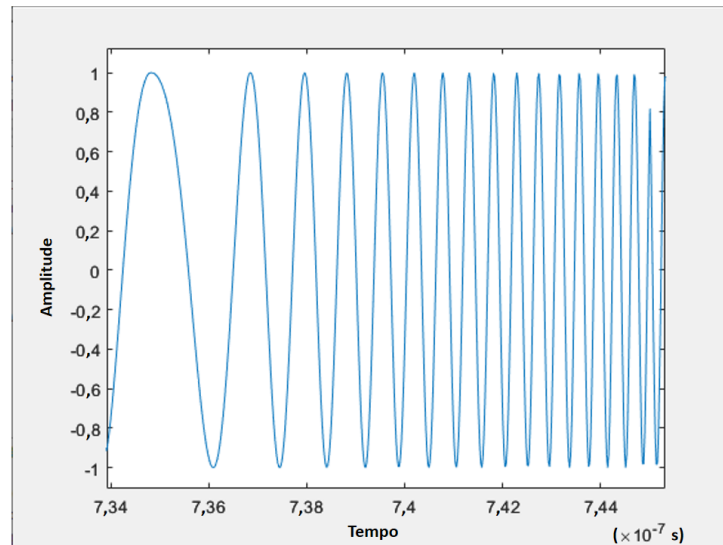
É importante destacar que o parâmetro adotado para indicar o nível de ruído não corresponde ao real valor de intensidade de ruído recebido pelo *gateway* em teste. SNR_0 é o valor do ruído incrementado ao sinal na origem, isto é, aos dados amostrados do sinal discretizado. Antes da transmissão, ocorre a conversão para um sinal analógico.

Tabela 1 – Parâmetros aplicados em teste de sensibilidade ao ruído.

Parâmetro	Valor
Número de dispositivos finais emulados	8
Canais	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Frequências portadoras	916,8 MHz, 917 MHz, 917,2 MHz, 917,4 MHz, 917,6 MHz, 917,8 MHz, 918 MHz e 918,2 MHz
Largura de banda (BW)	125 kHz
Fator de Espalhamento (SF)	7
Taxa de código (CR)	4/5
Tamanho da mensagem (<i>payload</i>)	8 bytes
Quantidade de pacotes transmitidos	800 (100 por dispositivo)
Intervalo	3 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

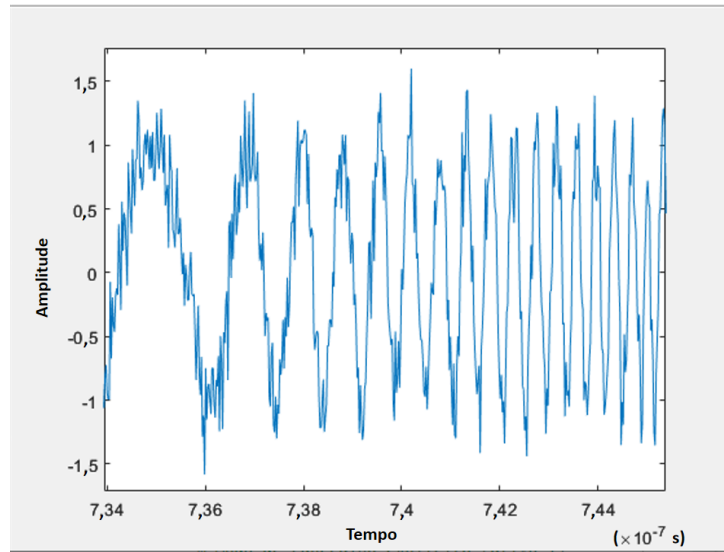
Figura 35 – Gráfico de sinal no domínio do tempo gerado pelo SDR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Teste de sensibilidade ao ruído com diferentes valores de SF

A relação sinal-ruído mínima necessária para garantir a recepção de sinal pelos circuitos integrados de rádio LoRa varia de acordo com o valor do Fator de Espalhamento (CALLEBAUT; PERRE, 2020). Entretanto, essa relação não é apresentada nos *datasheets* dos *gateways* RAK2287 e RHF2s008. De forma a exemplificar como o SF influencia na sensibilidade dos dispositivos à recepção de sinais LoRa, é apresentada na Tabela 2 a relação entre SNR mínimo e SF para o *chip* transceptor LoRa SX1276, utilizado comumente em sistemas embarcados para transmitir sinais de nós sensores (SEMTECH, 2020a). A

Figura 36 – Gráfico de sinal com ruído no domínio do tempo gerado pelo SDR ($SNR_o = 10\text{dB}$).

Fonte: Elaborado pelo autor.

partir da Tabela, é possível observar que o aumento no valor de SF implica em um menor valor de SNR.

Tabela 2 – Valores mínimos de SNR para cada valor de SF, referentes ao transceptor LoRa SX1276.

Fator de Espalhamento (SF)	SNR mínimo [dB]
6	-5,0
7	-7,5
8	-10,0
9	-12,5
10	-15,0
11	-17,5
12	-20,0

Fonte: Semtech (2020a).

Os parâmetros utilizados na realização do teste estão apresentados na Tabela 3.

4.4.4 Teste de resposta ao ganho de potência do sinal

O aumento da intensidade do sinal, com a aplicação de um ganho, deve corresponder a uma maior capacidade de recebimento de pacotes pelos *gateways* (CALLEBAUT; PERRE, 2020). Dessa forma, no teste de resposta ao aumento de ganho de potência do sinal, busca-se analisar a esperada redução na perda de pacotes.

A fim de promover a avaliação em um cenário onde há uma notável perda de pacotes, diferentes valores de ganho serão aplicados a um sinal com ruído. Evidencia-se que

Tabela 3 – Parâmetros aplicados em teste de sensibilidade ao ruído com variação de SF.

Parâmetro	Valor
Número de dispositivos finais emulados	1
Canal	0
Frequência portadora	916,8 MHz
Largura de banda (BW)	125 kHz
Taxa de código (CR)	4/5
Tamanho da mensagem (<i>payload</i>)	4 bytes
Quantidade de pacotes transmitidos	100
Intervalo	1 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

a adição do ganho implicará no aumento do ruído, nas mesmas proporções de acréscimo da amplitude do sinal, pois aplicação de ganho ocorre sobre os dados digitais de um sinal com ruído manipulado matematicamente, antes da conversão digital-analógica. Na tabela 4 estão descritos os valores de parâmetros configurados para a realização do teste.

Tabela 4 – Parâmetros aplicados em teste de resposta ao ganho de potência do sinal.

Parâmetro	Valor
Número de dispositivos finais emulados	1
Canal	0
Frequência portadora	916,8 MHz
Fator de Espalhamento (SF)	7
Largura de banda (BW)	125 kHz
Taxa de código (CR)	4/5
Tamanho da mensagem (<i>payload</i>)	4 bytes
Quantidade de pacotes transmitidos	100
Intervalo	1 s
SNR_0	3 dB

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 DESCRIÇÃO DOS TESTES FUNCIONAIS

A realização dos testes funcionais objetivou avaliar o desempenho de *gateways* LoRaWAN durante o recebimento de pacotes da plataforma de teste, quando submetidos à interferência causada por outros sinais LoRa, em que pode haver perda de pacotes.

4.5.1 Teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal

Considerando que a estrutura da camada física do protocolo LoRaWAN é baseada no protocolo ALOHA, sem aplicação de mecanismos de detecção de utilização do

canal. A comunicação pode ser afetada, devido à colisão de pacotes em um mesmo canal (POLONELLI; BRUNELLI; BENINI, 2018).

No teste de capacidade de recepção de pacotes proposto, em que é avaliada a taxa de pacotes entregues em uma situação comum de operação da rede, não há aplicação de ruído ao sinal enviado pelo SDR USRP-2922. Também não é introduzida qualquer tipo de interferência durante a realização do experimento, cujos valores de parâmetros definidos estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros aplicados em teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal.

Parâmetro	Valor
Número de dispositivos finais emulados	1
Canal	0
Frequência portadora	916,8 MHz
Fator de Espalhamento (SF)	8
Largura de banda (BW)	125 kHz
Taxa de código (CR)	4/5
Tamanho da mensagem (<i>payload</i>)	4 bytes
Quantidade de pacotes transmitidos	100
Intervalo	1 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Teste de interferência provocada por sinal em diferente canal

A realização do teste de interferência provocada por sinal em diferente canal tem a finalidade de avaliar os efeitos causados pela transmissão simultânea de sinais em canais diferentes, de acordo com os valores de parâmetros demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros aplicados em teste de interferência provocada por sinal em diferente canal.

Parâmetro	Dispositivo Final emulado	Feather M0
Canal	0	1
Frequência portadora	916,8 MHz	917 MHz
Largura de banda (BW)	125 kHz	125 kHz
Fator de Espalhamento (SF)	7	7
Taxa de código (CR)	4/5	4/5
Tamanho da mensagem (<i>payload</i>)	4 bytes	10 bytes
Quantidade de pacotes transmitidos	100	-
Intervalo	1 s	1 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

O experimento busca constatar se a ortogonalidade relacionada à frequência portadora, exposta por Croce et al. (2018), ocorre de forma precisa em aplicação real. Para isso, em conjunto com a plataforma de teste de *gateways*, foi utilizado um dispositivo, baseado na Feather M0, situado a 5 m de distância dos *gateways* LoRaWAN e a 0,2 m do SDR USRP-2922. O experimento consiste na transmissão de sinais LoRa através dos dois sistemas em diferentes canais, a fim de avaliar se ocorre interferência entre os sinais, e consequentemente, é causada a perda de pacotes. Portanto, será avaliada, no ensaio, a taxa de pacotes entregues.

4.5.3 Teste de interferência por colisão em vários canais

Considerando a vulnerabilidade de uma rede LoRaWAN, em relação à perda de pacotes por colisão apresentada na Subseção 4.5.1, foi realizada a análise de interferência em um experimento com maior número de dispositivos. Com isso, no teste de interferência por colisão em vários canais foram estabelecidos vários nós na rede LoRaWAN.

Através da plataforma de teste de *gateways*, foram emulados oito dispositivos finais, utilizando diferentes canais. Além disso, foram introduzidos à rede dois nós sensores baseados em Feather M0, configurados para transmitir sinais em intervalos fixos. Os nós foram programados em diferentes modos: um dos dispositivos utiliza um único canal (localizado a 5 metros dos *gateways* sob teste e a 0,2 m do SDR USRP-2922), enquanto o outro dispositivo foi programado para utilizar canais diversos (instalado a dezenas de metros dos *gateways* sob teste).

Os parâmetros utilizados na realização do experimento estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros aplicados em teste de interferência por colisão em vários canais.

Parâmetro	Dispositivos Finais emulados	Feather M0 1	Feather M0 2
Número de dispositivos	8	-	-
Canal(is)	Todos	0	Multicanais
Largura de banda (BW)	125 kHz	125 kHz	125 kHz
Fator de Espalhamento (SF)	11	11	11
Taxa de código (CR)	4/5	4/5	4/5
Tamanho da mensagem (<i>payload</i>)	4 bytes	10 bytes	-
Quantidade de pacotes transmitidos	800 (100 por dispositivo)	-	-
Intervalo	5 s	60 s	180 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

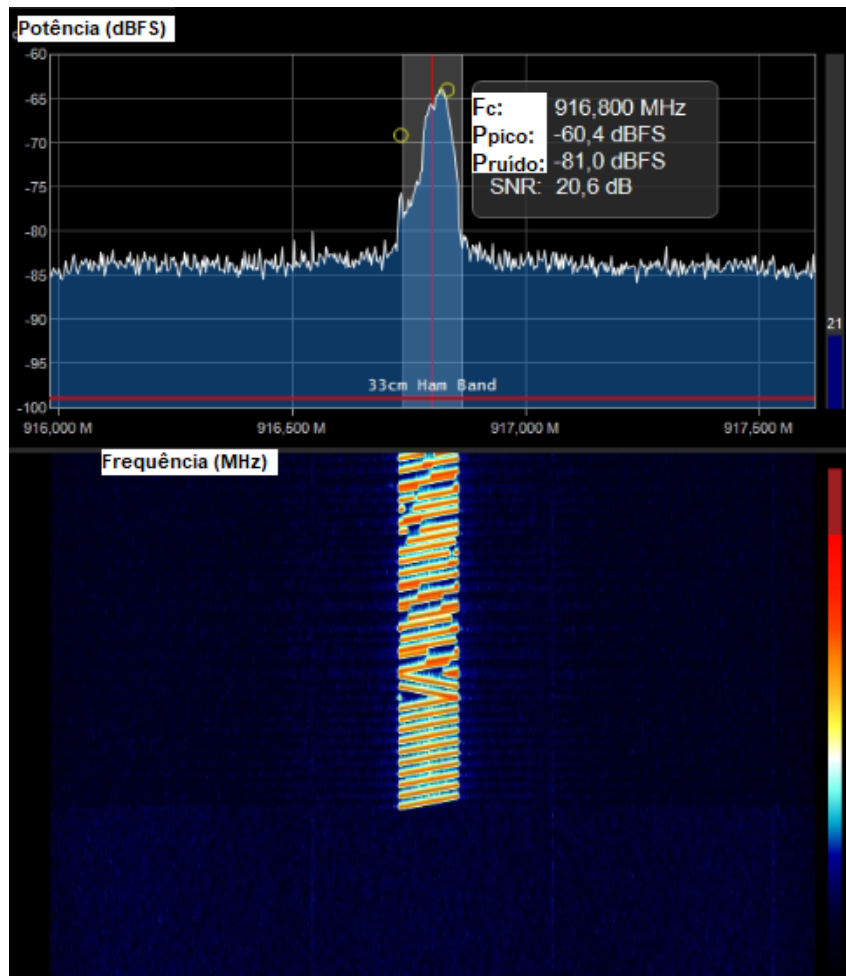
Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados através da plataforma de teste de *gateways* LoRaWAN, considerando as diferentes situações de emulação do dispositivos finais, a partir da mudança de parâmetros dos sinais. A análise permitirá estabelecer e comparar os desempenhos de dois diferentes *gateways* testados.

5.1 TESTES PARAMÉTRICOS

5.1.1 Análise do sinal gerado pelo Emulador de dispositivos finais

Na Figura 37 é apresentada a representação gráfica do sinal LoRa transmitido pelo SDR USRP-2922 no Emulador de dispositivos finais LoRaWAN, obtida a partir do software SDRSharp, em conjunto com o receptor do sinal SDR RTL.

Figura 37 – Gráfico de sinal gerado pelo SDR USRP-2922.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na parte superior da imagem é apresentado o gráfico de potência do sinal no

domínio da frequência, expressa em dBFS (dB *full scale*¹). O sinal apresentou um valor de potência igual a -60,4 dBFS, enquanto o nível de ruído indicado foi de -81 dBFS. Ocasionalmente um valor de SNR de 20,6 dB. O gráfico apresentado na parte inferior da imagem corresponde ao espectrograma do sinal, em que é possível observar os *chirps* característicos do sinal gerado a partir da modulação LoRa.

A representação gráfica do sinal LoRa gerado pelo Feather M0 é demonstrada na Figura 38, obtida a partir do software SDRSharp, cujo sinal foi interceptado pelo SDR RTL. Os gráficos indicam um menor valor de potência do sinal da Feather M0 em relação ao sinal gerado pelo Emulador de dispositivos finais LoRaWAN. O sinal apresentou um valor de potência de -73 dBFS, enquanto o nível de ruído indicado foi de -83,9 dBFS. Ocasionalmente um valor de SNR de 10,9 dB. É importante ressaltar a elevação no nível de ruído expresso na análise do sinal gerado pelo SDR, entretanto, o reconhecido ruído associado ao sinal gerado pelo SDR é considerado nos testes realizados. É possível verificar a correspondência dos *chirps* gerados pela Feather M0 com os transmitidos pelo Emulador de dispositivos finais LoRaWAN.

5.1.2 Teste de sensibilidade ao ruído

No gráfico ilustrado na Figura 41 são apresentadas as curvas obtidas pelo estabelecimento da relação entre a taxa de pacotes entregues e o aumento no nível de ruído do sinal gerado, expresso através do valor de SNR_0 . O desempenho apresentado pelo gateway RAK2287 foi constantemente superior ao da RHF2s008, na faixa de 2,6 dB a 3,8 dB. Observa-se que os valores relativos ao nível de ruído adicionado ao sinal causaram elevado prejuízo ao recebimento de pacotes pelos *gateways* sob teste. É importante ressaltar que o gráfico foi gerado a partir de teste em que foram emulados oito dispositivos finais. Sendo assim, cada dispositivo emulado utilizou um canal diferente, e portanto, valores diversos de frequência portadora. A tabela que consta no Apêndice B expõe a relação entre $PDR(\%)$ e SNR_0 para cada valor de frequência portadora do sinal.

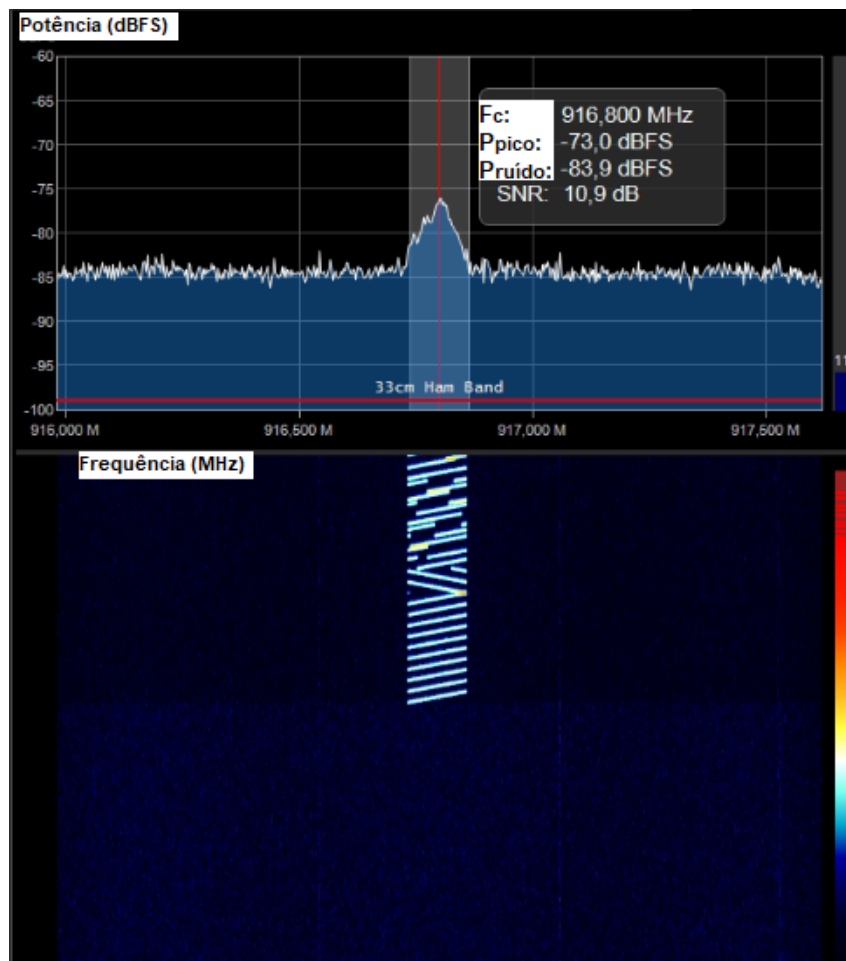
5.1.3 Teste de sensibilidade ao ruído com diferentes valores de SF

O teste realizado para análise de sensibilidade ao ruído para diferentes valores de Fator de Espalhamento permitiu comparar o desempenho dos *gateways* testados, considerando a interferência sobre a transmissão do sinal causada por ruído. Além disso, os resultados permitem estabelecer, em relação ao SNR_0 , valores máximos de níveis de ruído de sinal gerado pelo emulador, para cada valor de SF, para recepção de pacotes.

Na Figura 40 são apresentados os gráficos com os resultados do teste. Conforme esperado, é admissível um maior valor de SNR_0 à medida que o valor do SF é elevado. Ainda assim, para determinados valores de ruído incrementado ao sinal na origem, a

¹ Potência referente ao máximo suportado pelo dispositivo.

Figura 38 – Gráfico de sinal gerado pela Feather M0.



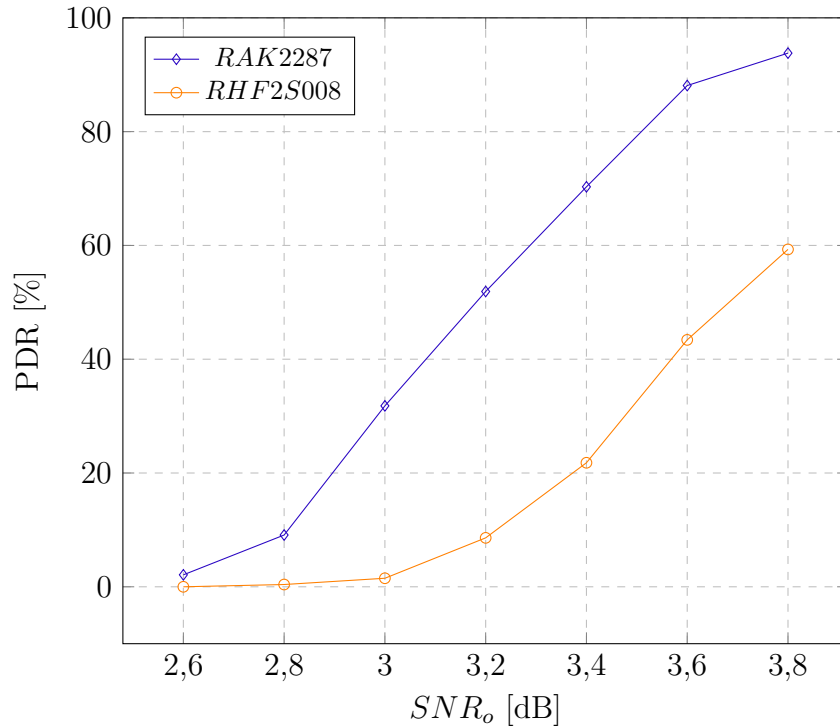
Fonte: Elaborado pelo autor.

diferença entre a taxa de recepção de pacotes do *gateway* RAK2287 e o valor apresentado pelo *gateway* Rising RHF2s008 foi expressiva. Esse fato pode ser exemplificado a partir da análise do gráfico da Figura 40d, onde é observada uma diferença de 45% na taxa de pacotes entregues.

5.1.4 Teste de resposta ao ganho de potência do sinal

O gráfico obtido a partir dos dados do teste para análise de resposta ao ganho de potência do sinal também evidenciou um importante diferença entre as taxas de pacotes recebidos pelos *gateways*. Observou-se que a adição de ganho ao sinal proporcionou o aumento na taxa de pacotes entregues para os dois *gateways* testados, entretanto, esse acréscimo foi mais acentuado no RAK2287. Além disso, a taxa de variação foi maior entre 1 dB e 2,5 dB.

Salienta-se ainda, que o ganho aplicado ao sinal resulta também em um maior valor de ruído, uma vez que o ganho é aplicado sobre um sinal adicionado de ruído gaussiano

Figura 39 – Relação entre SNR_o e PDR .

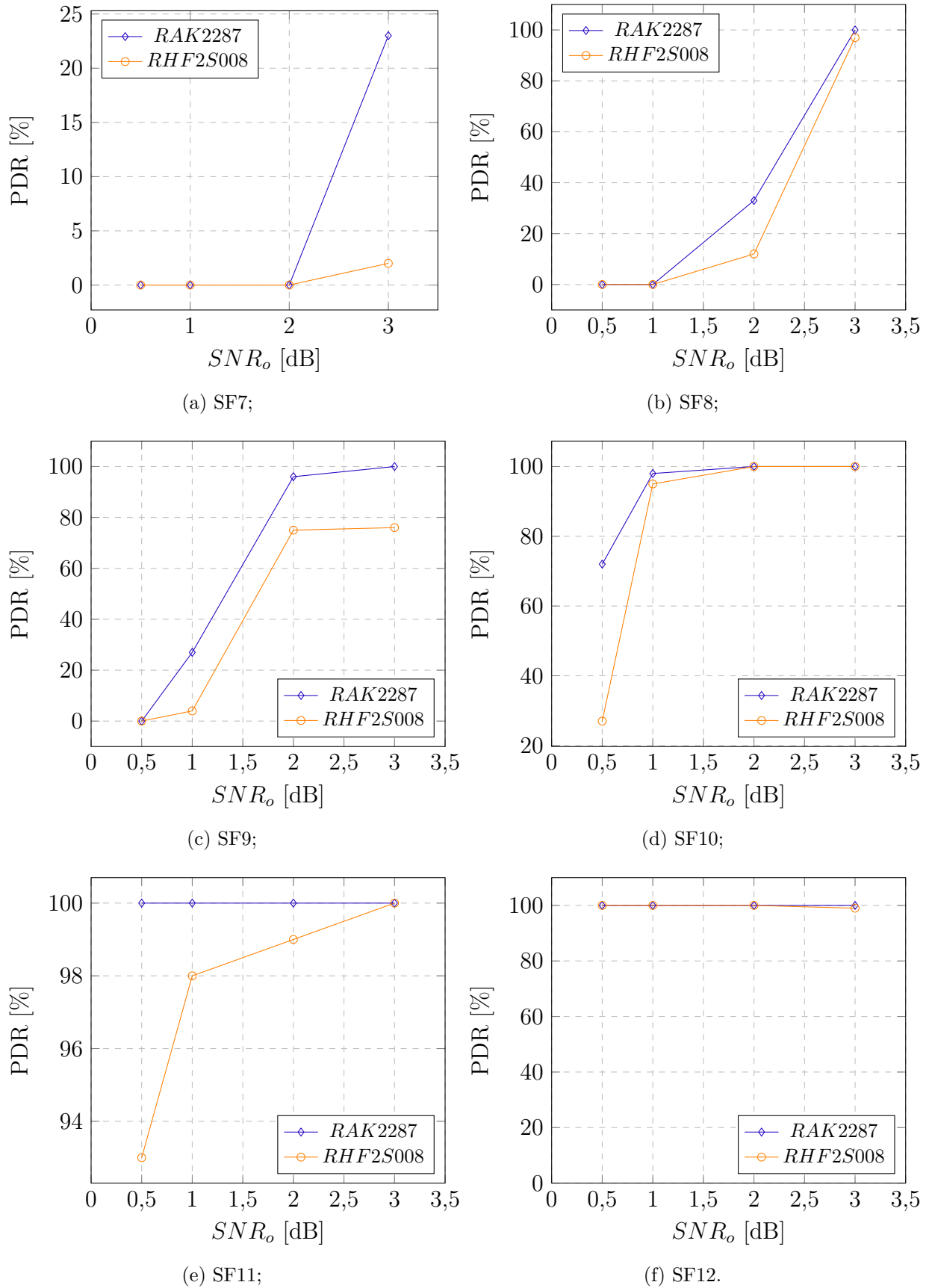
Fonte: Elaborado pelo autor.

branco, com SNR_0 igual a 3 dB. Na Tabela 8 são apresentados os valores médios de RSSI e SNR medidos pelos gateways RAK2287 e RHF2s008, respectivamente. Os dados indicam uma pequena variação nos valores de SNR, com o aumento do ganho. Entretanto, a intensidade do sinal, indicada a partir do valor de RSSI, apresentou considerável acréscimo. Esse era o resultado esperado, devido à aplicação do ganho sobre um sinal com adição ruído.

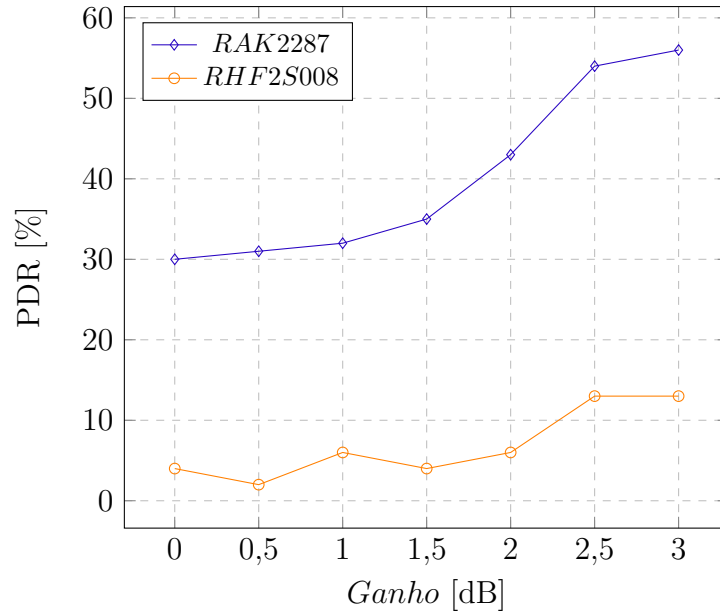
Tabela 8 – Valores de RSSI e SNR médios medidos pelos gateways RAK2287 e RHF2s008; e taxa de pacotes entregues para diferentes valores de ganho aplicado ao sinal.

Ganho	RAK2287			RHF2s008			ΔPDR
	SNR [dB]	$RSSI$ [dB]	PDR	SNR [dB]	$RSSI$ [dB]	PDR	
0,0	-9,8	-80,0	30%	-9,1	-64,0	4%	26%
5,0	-9,5	-75,0	31%	-9,3	-59,0	2%	29%
10,0	-9,7	-71,0	32%	-9,3	-52,7	6%	26%
15,0	-9,6	-67,0	35%	-9,2	-49,0	4%	31%
20,0	-9,6	-63,0	43%	-9,2	-45,0	6%	37%
25,0	-9,4	-45,0	54%	-8,9	-44,6	13%	41%
30,0	-9,4	-62,0	56%	-9,1	-47,9	13%	43%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 – Relação entre SNR_o e PDR para diversos valores de SF:

Fonte: Elaborado pelo autor.

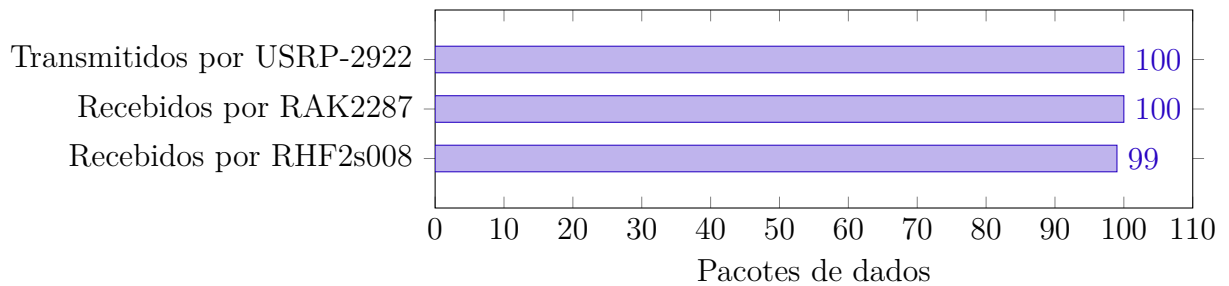
Figura 41 – Relação entre ganho de potência do sinal com ruído e PDR ($SNR_0 = 3$ dB).

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 TESTES FUNCIONAIS

5.2.1 Teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal

O teste de capacidade de recepção de pacotes em único canal resultou em perda de um único pacote de dados, conforme apresentado na Figura 42. A perda ocorreu no *gateway* RHF2s008, e pode ter sido originada por interferência de sinais e ruídos externos. Com isso, é possível evidenciar um melhor desempenho do *gateway* RAK2287 na ausência de interferência provocada. O resultado indica uma maior sensibilidade do *gateway* RHF2s008 à exposição de fontes de interferência comuns.

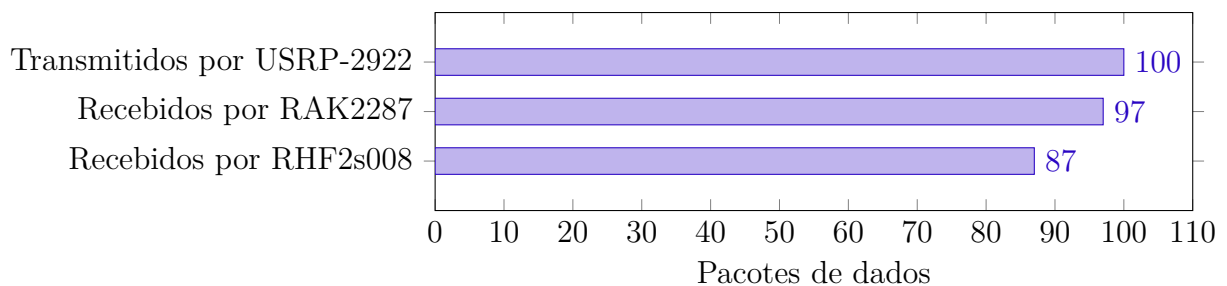
Figura 42 – Pacotes recebidos pelos *gateways* RAK2287 e RHF2s008, respectivamente, sem interferência provocada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Teste de interferência provocada por sinal em diferente canal

O resultado obtido no teste de interferência provocada por sinal em diferente canal indicou que dispositivos finais, que transmitem sinais com distintos valores de frequência, podem causar interferência na comunicação. A diferença de frequência de sinais transmitidos pelos dispositivos foi de 200 kHz. O desempenho do *gateway* RAK2287 permitiu mostrar que o dispositivo apresentou menor perda devido à interferência provocada pelo dispositivo Feather M0. O experimento permite expor a consequência da imperfeita ortogonalidade evidenciada nos *chips* de rádio LoRa, em relação à frequência (CROCE et al., 2018).

Figura 43 – Pacotes recebidos pelos *gateways* RAK2287 e RHF2s008, respectivamente. Experimento realizado com interferência provocada por sinal LoRa de diferente frequência.

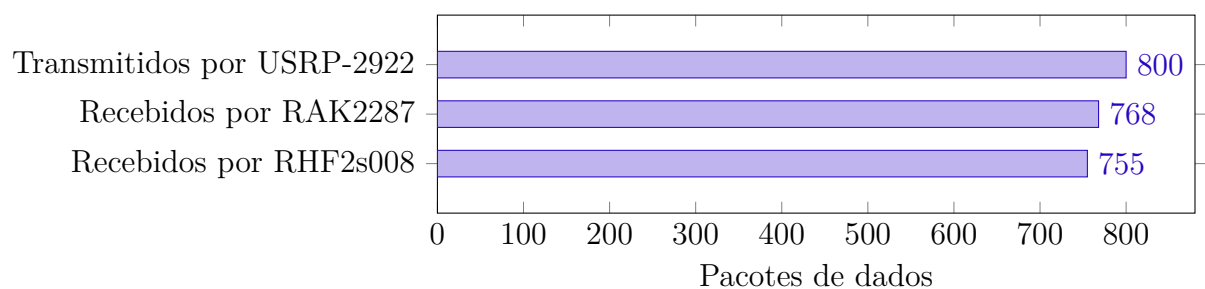


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3 Teste de interferência por colisão em vários canais

Foi evidenciada expressiva interferência provocada pelos dispositivos descritos na Subseção 4.1.3, demonstrada a partir dos dados resultantes do teste de interferência por colisão em vários canais, apresentados no gráfico da Figura 44. A análise indica um melhor desempenho do *gateway* RAK2287, diante da exposição à interferência provocada.

Figura 44 – Pacotes recebidos pelos *gateways* RAK2287 e RHF2s008, respectivamente. Experimento realizado com interferência provocada por dispositivos transmitindo sinais LoRa em vários canais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram realizados a concepção, desenvolvimento, implementação e análise de uma plataforma de teste de *gateways* LoRa para IoT baseada em Rádio Definido por *Software*. A partir da utilização da plataforma, foram realizados testes de *gateways*. Os testes realizados viabilizaram a análise de desempenho dos dispositivos e avaliação da qualidade da comunicação em uma rede LoRaWAN, mediante a aplicação de estímulos que simulam a real aplicação da tecnologia. Também foram analisados os padrões arquiteturais e tecnologias aplicadas à Internet das Coisas, permitindo associar à construção da plataforma de teste de *gateways* os aspectos técnicos e conceitos inerentes à IoT.

A prova de conceito de uma plataforma de teste de *gateways* LoRa para IoT baseada em Rádio Definido por *Software* foi estabelecida a partir de estudos promovidos sobre definições e técnicas relativas à tecnologia LoRaWAN e ao SDR. A partir disso, foi possível avaliar as técnicas e ferramentas adequadas para o desenvolvimento da plataforma, com base na análise teórica e empírica de sinais LoRa por meio da utilização de um ambiente de desenvolvimento composto por *softwares* para processamento digital de sinais e SDR. Por meio da análise dos sinais LoRa recebidos através do SDR, convertidos e processados através dos programas computacionais, foi possível observar o encapsulamento de dados digitais em uma rede LoraWAN, do ponto de vista do nível físico.

A necessária definição de métricas de teste de *gateways* foi estabelecida a partir da avaliação das características técnicas e pontos críticos relacionados ao protocolo LoRaWAN. Mas também foram consideradas as possibilidades de variação de parâmetros da plataforma de teste. Com isso, foi adotado, como principal critério para avaliação de *gateways*, a taxa de pacotes entregues (*Packet Delivery Rate* - PDR), que é um conhecido parâmetro no campo da Internet das Coisas e reflete bem o grau de qualidade da comunicação. A intrínseca relação entre o nível de PDR com potência e SNR do sinal recebido, motivaram a realização de testes com variação nos valores desses parâmetros, que podem ser alterados por meio da manipulação do sinal gerado pelo Rádio Definido por *Software*. Dentre as especificações relacionadas à tecnologia LoRaWAN e à modulação LoRa, o SF é um destacado parâmetro, cuja variação teve efeitos analisados por meio da realização de testes de *gateways*.

Um experimento, realizado com a utilização de um SDR de baixo custo, propiciou uma análise comparativa entre o sinal gerado pela plataforma de teste e um nó sensor provido de um circuito integrado transceptor LoRa. A execução desse teste contribuiu para validar a performance da plataforma, cujo desempenho atendeu de forma satisfatória e demonstrou uma forte similaridade entre os sinais.

A realização de testes funcionais permitiu avaliar o desempenho dos dois *gateways*

sob teste, quando a transmissão é submetida à interferência de sinais LoRa gerados por sistemas embarcados. Dessa forma, constatou-se que a interferência pode causar real prejuízo à comunicação. Além disso, observou-se a perda de pacotes, mesmo quando os dispositivos utilizam diferentes canais. Com isso, os resultados apresentados puderam ser aplicados para atestar os efeitos esperados com a variação dos parâmetros. Isso foi observado, por exemplo, na melhora da capacidade de recepção de sinal com ruído pelo *gateway*, a partir do aumento no valor de SF.

Por fim, os resultados obtidos a partir da realização dos testes demonstraram uma relevante diferença de desempenho entre os *gateways* sob teste. Avaliou-se que o RAK2287 apresentou menor sensibilidade ao ruído e à interferência e maior taxa de entrega de pacotes, em todos os testes aplicados. A utilização do circuito integrado concentrador SX1302, que é diferente do SX1301 utilizado pelo *gateway* RHF2s008, pode ter influência sobre o melhor desempenho do dispositivo RAK. Entretanto, outros aspectos construtivos do dispositivo também podem influenciar no funcionamento do equipamento. Conclui-se, portanto, que a utilização da plataforma de teste de *gateways* LoRa para IoT, apresentada neste trabalho, permitiu extrair importantes informações de desempenho dos *gateways* RAK2287 e RHF2s008. Além disso, foram avaliados os efeitos causados pela variação de parâmetros em uma rede LoRaWAN, e importantes características do protocolo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando o desenvolvimento de uma solução para a realização de testes de *gateway* LoRa para IoT e a apresentação dos resultados de testes dos *gateways* RAK2287 e RHF2s008, é possível listar algumas possibilidades de trabalhos futuros relacionados:

1. Aprimoramento da plataforma de teste de *gateways*, com integração de outros mecanismos especificados pelo protocolo LoRaWAN, por exemplo, taxa de dados adaptativa (ADR);
2. Avaliação de outros modelos de *gateways* LoRaWAN;
3. Realização de testes de *gateways* para avaliar os efeitos da variação de parâmetros não alterados neste trabalho, por exemplo, taxa de código;
4. Implementação de plataforma, baseada em SDR, para definição otimizada de parâmetros de comunicação de dispositivos em redes LoRaWAN;
5. Avaliação da plataforma de teste de *gateway* LoRa para IoT em ambiente com isolamento eletromagnética.

REFERÊNCIAS

- AFTAB, N.; ZAIDI, S. A. R.; MCLERNON, D. Scalability analysis of multiple LoRa gateways using stochastic geometry. *Internet of Things*, v. 9, p. 100132, 2020. ISSN 2542-6605. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660519301027>>.
- AKEELA, R.; DEZFOULI, B. Software-defined Radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges. 4 2018. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1804.06564>>.
- ANATEL. *CARTILHA ORIENTATIVA - INTERNET DAS COISAS*. 2020. Disponível em: <<https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/a028ab5cc4e3f97442830bba0c8bd1dd>>.
- ANZUM, R. Factors that affect LoRa Propagation in Foliage Medium. *Procedia Computer Science*, v. 194, p. 149–155, 2021. ISSN 1877-0509. 18th International Learning Technology Conference 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921021098>>.
- ASHTON, K. *That “Internet of Things” Thing*. 2009. Disponível em: <<https://www.chirpstack.io/project/architecture/>>.
- AZARI, A.; MASOUDI, M. Interference management for coexisting Internet of Things networks over unlicensed spectrum. *Ad Hoc Networks*, v. 120, p. 102539, 2021. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870521000901>>.
- BAUER, M. et al. *Internet of Things – Architecture IoT-A Deliverable D1.5 – Final architectural reference model for the IoT v3.0*. 2013.
- BEITLER, A.; CARACAS, A.; FULLER, R. *Expert Series: 5 Things You Need to Know about LoRaWAN-based Gateways*. 2020.
- BOSE, V. G. The impact of software radio on wireless networking. *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, v. 3, p. 30–37, 1999.
- BREIVOLD, H. P. A survey and Analysis of Reference Architectures for the Internet-of-things. *ICSEA 2017: The Twelfth International Conference on Software Engineering Advances*, 2017.
- CALLEBAUT, G.; PERRE, L. Van der. Characterization of LoRa Point-to-Point Path Loss: Measurement Campaigns and Modeling Considering Censored Data. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 3, p. 1910–1918, 2020.
- CHIRPSTACK. *ChirpStack architecture*. s.d. Disponível em: <<https://www.chirpstack.io/project/architecture/>>.
- COUTAUD, U.; HEUSSE, M.; TOURANCHEAU, B. Lora Channel Characterization for Flexible and High Reliability Adaptive Data Rate in Multiple Gateways Networks. *Computers*, v. 10, p. 44, 04 2021.
- CROCE, D. et al. Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance. *IEEE Communications Letters*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 22, p. 796–799, 4 2018. ISSN 10897798.

- DANYMOL, R.; AJITHA, T.; GANDHIRAJ, R. Real-time communication system design using RTL-SDR and Raspberry Pi. In: *2013 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5.
- EL-AASSER, M. et al. A comprehensive hybrid bit-level and packet-level LoRa-LPWAN simulation model. *Internet of Things (Netherlands)*, Elsevier B.V., v. 14, 6 2021. ISSN 25426605.
- FIALHO, V.; AZEVEDO, F. Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices. *i-ETC : ISEL Academic Journal of Electronics Telecommunications and Computers*, v. 4, n. 1, p. 6, 2018. ISSN 2182-4010. Disponível em: <<http://journals.isel.pt/index.php/i-ETC/article/view/51>>.
- GARG, V. K. Chapter 23 - Fourth Generation Systems and New Wireless Technologies. In: GARG, V. K. (Ed.). *Wireless Communications Networking*. Burlington: Morgan Kaufmann, 2007, (The Morgan Kaufmann Series in Networking). p. 23–1–23–22.
- HASAN, M. *State of IoT 2022: Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally*. 2022. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/#sample-request-form>>.
- HOMSSI, B. A. et al. Iot Network Design Using Open-Source LoRa Coverage Emulator. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 9, p. 53636–53646, 2021. ISSN 21693536.
- IEEE. *IEEE Std 2413-2019 - IEEE Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things (IoT)*. IEEE, 2020. ISBN 9781504458863. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9032420/references#references>>.
- IOT-A. *Introduction to IoT-A*. 2022. Disponível em: <<https://www.ietf-a.eu/>>.
- LATHI, E. B. P.; DING, Z. *Modern Digital and Analog Communication Systems*. 4. ed. New York, NY: Oxford University Press, 2008. (Oxford Series in Electrical and Computer Engineering (Hardcover)).
- LIN, S.-W. et al. The Industrial Internet of Things Reference Architecture. *Industrial Internet Consortium (IIC), Tech. Rep*, v. 1.9, 2019.
- LOUBANY, A.; LAHOUD, S.; CHALL, R. E. Adaptive algorithm for spreading factor selection in LoRaWAN networks with multiple gateways. *Computer Networks*, Elsevier B.V., v. 182, 12 2020. ISSN 13891286.
- MARQUET, A.; MONTAVONT, N.; PAPADOPOULOS, G. Z. Towards an SDR implementation of lora: Reverse-engineering, demodulation strategies and assessment over Rayleigh channel. *Computer Communications*, v. 153, p. 595–605, 2020. ISSN 0140-3664. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366419314665>>.
- MATHWORKS. *Matlab AWGN Channel web page*. 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/comm/ug/awgn-channel.html#a1071501088>>.
- MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, Korean Institute of Communications Information Sciences, v. 5, p. 1–7, 3 2019. ISSN 24059595.

- MINERVA, R.; BIRU, A.; ROTONDI, D. Towards a Definition of the Internet of Things (IoT). *IEEE Internet Initiative*, v. 1, 2015. ISSN 09758887.
- NI. *USRP-2922 Specifications*. 2022. Disponível em: <<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2922-specs/page/specs.html>>.
- PETAJAJARVI, J. et al. Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring. In: *10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.
- PETRARIU, A. I.; LAVRIC, A.; COCA, E. LoRaWAN Gateway: Design, Implementation and Testing in Real Environment. In: *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 49–53.
- PHUNG, K.-H. et al. Analysis and assessment of LoRaWAN. In: *2018 2nd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications Computing (SigTelCom)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 241–246.
- POLONELLI, T.; BRUNELLI, D.; BENINI, L. Slotted ALOHA Overlay on LoRaWAN - A Distributed Synchronization Approach. In: *2018 IEEE 16th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 129–132.
- RAKWIRELESS. *RAK2287 WisLink LPWAN Concentrator datasheet*. RAK Documentation Center, 2021. Disponível em: <<https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisLink/RAK2287/Datasheet/#overview>>.
- REYNDERS, B.; MEERT, W.; POLLIN, S. Power and spreading factor control in low power wide area networks. In: *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- RIZZI, M. et al. Evaluation of the IoT LoRaWAN Solution for Distributed Measurement Applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 66, n. 12, p. 3340–3349, Dec 2017. ISSN 1557-9662.
- ROBYNS, P. et al. A Multi-Channel Software Decoder for the LoRa Modulation Scheme. In: INSTICC. *Proceedings of the 3rd International Conference on Internet of Things, Big Data and Security - IoTBDS*. [S.l.]: SciTePress, 2018. p. 41–51. ISBN 978-989-758-296-7. ISSN 2184-4976.
- RUOTSALAINEN, H. et al. LoRaWAN Physical Layer-Based Attacks and Countermeasures, A Review. *Sensors*, MDPI, v. 22, 5 2022. ISSN 14248220.
- SAIF, S. et al. Chapter 11 - Smart e-agriculture monitoring systems. In: ABRAHAM, A. et al. (Ed.). *AI, Edge and IoT-based Smart Agriculture*. Academic Press, 2022, (Intelligent Data-Centric Systems). p. 183–203. ISBN 978-0-12-823694-9. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128236949000025>>.
- SEMTECH. *AN1200.22 LoRa Modulation Basics*. 2015. Disponível em: <<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJk/yDEcfAkD9qEz6oG3PJryoHKas3UMsMDa3TFqz1UQOkM>>.
- _____. *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview*. 2019. Disponível em: <https://loro-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>.

_____. *SX1250 Multi-band Sub-GHz RF Front End datasheet*. [S.l.]: Semtech, 2019.

_____. *SX1276 datasheet*. [S.l.]: Semtech, 2020.

_____. *SX1302 LoRa Gateway Baseband Processor datasheet*. [S.l.]: Semtech, 2020.

SILVA, J. de C. et al. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. In: *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

SLATS, L. *A Brief History of LoRa: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference*. 2020. Disponível em: <<https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>>.

SNEHA et al. Narrow band-IoT and long-range technology of IoT smart communication: Designs and challenges. *Computers Industrial Engineering*, v. 172, p. 108572, 2022. ISSN 0360-8352. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835222005733>>.

SORNIN, N. et al. *LoRaWAN Specification v1.0.2*. [S.l.]: LoRa Alliance, 2016.

STANKOVIC, J. A. Research directions for the internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 1, p. 3–9, 2 2014. ISSN 23274662.

STEWART, R. W. et al. A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 9, p. 64–71, 2015.

SWAIN, M. et al. LoRa-LBO: An Experimental Analysis of LoRa Link Budget Optimization in Custom Build IoT Test Bed for Agriculture 4.0. *Agronomy*, v. 11, n. 5, 2021. ISSN 2073-4395. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4395/11/5/820>>.

TAPPAREL, J. et al. An Open-Source LoRa Physical Layer Prototype on GNU Radio. 2 2020. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2002.08208>>.

TTN. *The Things Network - Getting Started*. 2022. Disponível em: <<https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/ttn/>>.

URIBE, J. de J. R.; GUILLEN, E. P.; CARDOSO, L. S. *A technical review of wireless security for the internet of things: Software defined radio perspective*. [S.l.]: King Saud bin Abdulaziz University, 2021.

VAILSHERY, L. S. *Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030*. 2022. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/#:~:text=The%20number%20of%20Internet%20of,around%205%20billion%20consumer%20devices.>>>

WEYRICH, M.; EBERT, C. Reference architectures for the internet of things. *IEEE Software*, IEEE Computer Society, v. 33, p. 112–116, 1 2016. ISSN 07407459.

XU, Z. et al. From Demodulation to Decoding: Towards Complete LoRa PHY Understanding and Implementation. *ACM Transactions on Sensor Networks*, Association for Computing Machinery (ACM), 7 2022. ISSN 1550-4859.

ZANAJ, E. et al. Energy Efficiency in Short and Wide-Area IoT Technologies—A Survey. *Technologies*, v. 9, 3 2021. ISSN 2227-7080.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS PELO SDR COM UTILIZAÇÃO DO MATLAB.

```
% Encontra o rádio e apresenta informações
sdrinfo = findsdru
% Cria objeto com as propriedades do rádio
radio = comm.SDRuReceiver;

% Ajuste de parâmetros:
% Frequência central do sinal
radio.CenterFrequency = 9.1500e+08;
% Número de amostras por quadro
radio.SamplesPerFrame = 1e5;
% Fator de decimação: é a relação entre a taxa de amostragem e
% e a frequência do oscilador mestre
radio.DecimationFactor = 50;
% Taxa de amostragem
sampleRate = radio.MasterClockRate/radio.DecimationFactor

% Promove a captação de dados de sinal recebido pelo do SDR
radioLog = dsp.SignalSink;
    for counter = 1:20
        data = radio();
        radioLog(data);
    end
release(radio);
release(radioLog);
```

APÊNDICE B – RELAÇÃO ENTRE SNR_0 E $PDR(\%)$ PARA DIVERSOS VALORES DE FREQUÊNCIA

Tabela 9 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 916,8 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	2	0
2,8	9	0
3,0	59	2
3,2	44	6
3,4	73	15
3,6	88	50
3,8	92	46

Tabela 10 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	2	0
2,8	11	0
3,0	33	3
3,2	69	12
3,4	83	26
3,6	97	50
3,8	98	65

Tabela 11 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,2 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	1	0
2,8	4	0
3,0	26	1
3,2	41	12
3,4	65	17
3,6	81	46
3,8	89	58

Tabela 12 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,4 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	0	0
2,8	7	0
3,0	18	0
3,2	36	6
3,4	62	15
3,6	84	28
3,8	92	63

Tabela 13 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,6 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	2	0
2,8	8	0
3,0	31	2
3,2	71	11
3,4	76	25
3,6	93	49
3,8	96	62

Tabela 14 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 917,8 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	6	0
2,8	12	3
3,0	36	1
3,2	64	14
3,4	80	33
3,6	93	45
3,8	99	74

Tabela 15 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 918 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	3	0
2,8	18	0
3,0	36	3
3,2	48	3
3,4	73	24
3,6	89	37
3,8	95	59

Tabela 16 – Relação entre SNR_0 e $PDR(\%)$ para frequência portadora igual a 918,2 MHz

SNR_0 [dB]	PDR (%) (RAK2287)	PDR (%) (RHF2s008)
2,6	1	0
2,8	4	0
3,0	15	0
3,2	42	5
3,4	50	19
3,6	80	42
3,8	89	47