

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FERNANDO SANTOLIN

**LoRaWAN: Análise da Camada Física e Estudo
de Coexistência**

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS FERNANDO SANTOLIN

**LoRaWAN: Análise da Camada Física e Estudo de
Coexistência**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ivan Müller

Porto Alegre

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Santolin, Lucas Fernando
LoRaWAN: Análise da Camada Física e Estudo de
Coexistência / Lucas Fernando Santolin. -- 2019.
76 f.
Orientador: Ivan Müller.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Internet das Coisas. 2. Low Power Wide Area
Networks. 3. LoRa. 4. LoRaWAN. I. Müller, Ivan,
orient. II. Título.

*You can't always get what you want
but if you try sometime
you'll find
you get what you need.*

(Mick Jagger, Keith Richards)

Resumo

As redes *Low-Power Wide Area* (LPWA) representam um novo paradigma de comunicação que permite com que pequenas quantidades de informação sejam transmitidas de maneira esparsa sobre longas distâncias, ao custo de um baixo consumo energético e uma taxa de dados reduzida. Essas redes vêm se tornando cada vez mais populares no cenário da Internet das Coisas, pois suas características atendem às demandas de diversas indústrias (logística, agricultura de precisão, etc.) e viabilizam uma série de novas aplicações. Dentre as principais redes LPWA no mercado atualmente, a rede LoRaWAN tem sido largamente adotada e mostra um grande potencial de crescimento. Este trabalho implementa um enlace de rádio LoRaWAN a fim de analisar o funcionamento da sua camada física (LoRa) e avaliar a performance desta em ambientes de coexistência. É realizada uma descrição da modulação/demodulação LoRa com base em pacotes capturados utilizando um rádio definido por software (SDR). A robustez da modulação contra interferências de banda larga é avaliada de maneira prática através de um experimento de coexistência realizado em um ambiente confinado. Os resultados mostram que a rede LoRaWAN, apesar da sua simplicidade, é extremamente robusta contra interferências, porém sua eficácia assume um compromisso com a taxa de dados e, conseqüentemente, a carga útil dos pacotes transmitidos.

Palavras-chave: Internet das Coisas; *Low Power Wide Area Networks*; LoRa; LoRaWAN

Abstract

Low-Power Wide Area Networks (LPWAN) represent a new communication paradigm which allows for small amounts of data to be transmitted over long distances in a very low power manner at the cost of a reduced data rate. These networks are gaining a lot of momentum and becoming very popular in the context of the Internet of Things. This is mainly due to the wide range of new and existing applications they can serve in multiple industries (like logistics and precision agriculture). Among the most popular LPWAN networks in the market today, LoRaWAN has been largely adopted and shows great potential for growth in the upcoming years. In this paper the author implements a LoRaWAN radio link in order to evaluate its physical layer and its coexistence performance. The LoRa modulation/demodulation process is described based on packets captured using a software defined radio (SDR). The robustness of the protocol against wideband interferers is investigated through a coexistence experiment done in a confined environment. The results show that, even though it is simple and lightweight, the LoRaWAN network is extremely robust against interferers. However, there is a clear tradeoff between the effectiveness to suppress the interference and the data rate of the transmission, which also affect the size of the payload allowed per packet.

Keywords: Internet of Things; Low Power Wide Area Networks; LoRa; LoRaWAN

Lista de Figuras

Figura 1 – Composição das mensagens <i>uplink</i> da camada física.	20
Figura 2 – Composição das mensagens <i>downlink</i> da camada física.	21
Figura 3 – Pilha de protocolo da rede LoRaWAN.	22
Figura 4 – Arquitetura da rede LoRaWAN.	23
Figura 5 – Comparação da latência versus consumo energético de diferentes classes de dispositivos.	24
Figura 6 – Diagrama de representação da abertura das janelas de recepção nos nós LoRa.	25
Figura 7 – Diagrama de expansão da estrutura de uma mensagem LoRaWAN. . .	26
Figura 8 – Estrutura do MHDR.	26
Figura 9 – Estrutura do FHDR.	27
Figura 10 – Estrutura do DevAddr.	27
Figura 11 – Diferentes subcampos do FCtrl.	27
Figura 12 – Estrutura das mensagens de <i>join request</i>	30
Figura 13 – Estrutura das mensagens de <i>join accept</i>	30
Figura 14 – Estrutura do campo DLSettings nas mensagens de <i>join accept</i>	30
Figura 15 – Configuração dos canais da rede LoRaWAN na região US902-9028 MHz	31
Figura 16 – Placa de <i>breakout</i> e Raspberry Pi 3 Modelo B à esquerda. <i>Gateway</i> Montado à direita	37
Figura 17 – Placa de desenvolvimento EK-S76SXB.	38
Figura 18 – Diagrama de blocos do SiP S76S.	38
Figura 19 – Diagrama de transações entre a camada MAC e de aplicação na implementação de referência de um dispositivo que opera na rede LoRaWAN.	39
Figura 20 – Máquina de estados implementada no dispositivo transmissor. T representa um período customizável de acordo com o teste a ser realizado. .	40
Figura 21 – <i>Software Defined Radio</i> LimeSDR Mini.	43
Figura 22 – Atenuadores 8496B e 8494B ligados em série por uma ponte coaxial. . .	46
Figura 23 – Combinador/divisor de sinais Wilkinson J2065.	47
Figura 24 – Ponteira para medição de potência U2001A e analisador de espectro N9912A.	48
Figura 25 – Configuração do experimento realizado para validação do enlace. . . .	50
Figura 26 – Mensagem publicada pelo <i>gateway</i> ao receber uma mensagem do nó transmissor.	50
Figura 27 – Mensagem publicada pelo servidor da rede ao receber os dados a <i>PHY-Payload</i> e os metadados encaminhados pelo encaminhador de pacotes do <i>gateway</i>	53

Figura 28 – Mensagem recebida pelo servidor de aplicação contendo a carga útil (FRMPayload) e alguns metadados da mensagem.	54
Figura 29 – Montagem do experimento para a captura de sinais LoRa para análise posterior.	55
Figura 30 – Diagrama de blocos necessário para a captura de sinais modulados LoRa.	56
Figura 31 – Espectrograma dos diferentes sinais LoRa capturados. O eixo horizontal da de cada um dos quatro sinais na figura representa o tempo, enquanto que o vertical representa a frequência.	57
Figura 32 – Espectrograma do preâmbulo dos pacotes LoRa.	59
Figura 33 – Espectrograma de uma sequência de <i>chirps</i> modulados. As linhas verticais delimitam cada um dos símbolos apresentados.	60
Figura 34 – Diagrama de blocos utilizado para a geração do sinal interferente DQPSK.	62
Figura 35 – Espectro de frequência do sinal DQPSK utilizado como interferência. .	62
Figura 36 – Configurações de medidas de potência para calibração do dispositivo LoRa. (a) Medição da potência de saída do kit EK-S76SXB. (b) Medição da potência de saída do kit EK-S76SXB ligado ao divisor de sinais. (c) Medição da potência de saída do kit EK-S76SXB ligado ao divisor de sinais e atenuado de 40dB	63
Figura 37 – Configurações de medidas de potência para calibração da interferência. (a) Medição da potência de saída do LimeSDR Mini. (b) Medição da potência de saída do LimeSDR Mini ligado ao divisor de sinais através do atenuador variável.	65
Figura 38 – Configuração do experimento de análise de comunicação sob coexistência.	66
Figura 39 – Esquemático da placa de <i>breakout</i> com as ligações para o cabeçalho de pinos do <i>Raspberry Pi</i>	75
Figura 40 – <i>Layout</i> da placa de <i>breakout</i> fabricada.	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela comparativa entre as principais características das redes LPWA LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT.	17
Tabela 2 – Taxas de dados disponíveis para a região LoRaWAN US902-928 MHz .	32
Tabela 3 – Tamanho máximo da MacPayload e FRMPayload para cada DR na a região LoRaWAN US902-928 MHz	33
Tabela 4 – Especificações elétricas e de rádio frequência do módulo transceptor RFM95W.	35
Tabela 5 – Especificações técnicas do Raspberry Pi 3 modelo B.	35
Tabela 6 – Relação de conexões entre o módulo RFM95W e o Raspberry Pi. . . .	36
Tabela 7 – Especificações técnicas do ACSiP S76S.	39
Tabela 8 – Especificações técnicas do LimeSDR-Mini v1.2.	44
Tabela 9 – Resumo dos parâmetros de transmissão do dispositivo para o experimento.	49
Tabela 10 – Resumo dos parâmetros de ativação ABP do dispositivo transmissor. .	50
Tabela 11 – Campos da <i>PHYPayload</i> decriptados.	52
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros de ativação ABP do dispositivo transmissor. .	56
Tabela 13 – Resultados das medições dos parâmetros dos sinais LoRa capturados. Os pacotes foram transmitidos utilizando uma carga útil de aplicação de 11 <i>bytes</i> , sendo a carga útil total (<i>PHYPayload</i>) de 24 <i>bytes</i>	58
Tabela 14 – Parâmetros dos pacotes calculados com base nas equações 2.2, 2.3 e 2.7 a 2.10.	58
Tabela 15 – Resultados da calibração de potência do sinal LoRa. A potência de saída do sinal é a potência medida diretamente na saída do nó transmissor. .	64
Tabela 16 – Resultados da calibração de potência do sinal interferente. A potência de saída do sinal é a potência medida diretamente na saída do SDR utilizada para a transmissão.	64
Tabela 17 – Resultados do experimento de análise de coexistência para um sinal LoRa transmitido com taxa de dados DR0 e $CR = 4/5$ em um ambiente com interferência DQPSK.	67
Tabela 18 – Resultados do experimento de análise de coexistência para um sinal LoRa transmitido com taxa de dados DR3 e $CR = 4/5$ em um ambiente com interferência DQPSK.	68
Tabela 19 – Valor da SNR mínima requerida na entrada do receptor SX1276 para que o sinal LoRa seja demodulado corretamente.	68

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ABP	Ativação por Personalização (<i>Activation by Personalization</i>)
BPS	Bits por Segundo
BW	Largura de Banda (<i>Bandwidth</i>)
CR	Taxa de Código (<i>Code Rate</i>)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
CW	Onda Contínua (<i>Continuous Wave</i>)
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DR	<i>Data Rate</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ERB	Estação Rádio Base
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
ISM	Industriais, Científicas e Médicas (<i>Industrial, Scientific and Medical</i>)
LPWA	<i>Low Power Wide Area</i>
MAC	Controle de Acesso do Meio (<i>Medium Access Control</i>)
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
OTAA	Ativação pelo Ar (<i>Over-the-Air Activation</i>)
PER	Taxa de Erro de Pacote (<i>Packet Error Rate</i>)
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>

SDR	Rádio Definido por Software (<i>Software Defined Radio</i>)
SF	Fator de Espalhamento (<i>Spreading Factor</i>)
SNR	Relação Sinal Ruído (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TTN	<i>The Things Network</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
UNB	Banda <i>Ultra-Estreta (Ultra-Narrow Band)</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Redes <i>Low Power Wide Area</i>	14
2.1.1	Sigfox	15
2.1.2	NB-IoT	16
2.1.3	LoRaWAN	16
2.2	A Camada Física LoRa	17
2.2.1	Formato das Mensagens <i>Uplink</i>	20
2.2.2	Formato das Mensagens <i>Downlink</i>	21
2.3	A Rede LoRaWAN	21
2.3.1	Arquitetura da Rede	22
2.3.2	A Camada de Controle de Acesso de Meio	23
2.3.3	Procedimentos de Ativação dos Nós na Rede	28
2.3.4	Parâmetros Regionais (LoRaWAN)	31
3	MÉTODOS E MATERIAIS	34
3.1	Implementação do <i>Gateway</i>	34
3.2	Implementação do Dispositivo Transmissor (nó)	37
3.3	Validação do Enlace de Rádio	41
3.4	Aquisição da Forma de Onda LoRa	43
3.5	Análise de Comunicação Sob Coexistência	45
4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	49
4.1	Validação do Enlace de Rádio	49
4.2	Aquisição da Forma de Onda LoRa	54
4.3	Análise de Comunicação Sob Coexistência	61
5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXO A – PLACA DE <i>BREAK OUT</i> DO MÓDULO RFM95W PARA <i>RASPBERRY PI</i>	75
A.1	Esquemático	75
A.2	<i>Layout</i> da Placa de Circuito Impresso	76

1 Introdução

A Internet das Coisas (IoT) é um termo que hoje é largamente utilizado para descrever objetos que interagem com o ambiente de maneira passiva ou ativa e estão, de alguma forma, conectados a Internet. Nesse contexto, redes de alto alcance e baixo consumo energético denominadas de *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN) representam um novo paradigma de comunicação, que surge para complementar os padrões celulares e sem fio existentes nas diversas aplicações previstas para a Internet das Coisas (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). O grande diferencial apresentado por estas redes está contido em seu nome. A habilidade de fornecer um enlace de comunicação com alcance de dezenas de quilômetros e o baixo consumo energético, capaz de manter dispositivos alimentados por bateria ativos por anos, são algumas das características únicas oferecidas por essas tecnologias. Seu sucesso é atribuído ao fato de que tecnologias celulares e de baixo alcance não são o suficiente para conectar dispositivos de baixa potência sobre grandes áreas geográficas, apresentando um gargalo quando se trata de aplicações de cidades inteligentes, logística e monitoramento remoto de grandes áreas (aplicações rurais).

Segundo (NOKIA, 2016) referenciado em (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017), até o ano de 2025 espera-se que cerca de 30 bilhões de dispositivos estejam conectados à Internet das Coisas, sendo estimado que cerca um quarto destes dispositivos estejam conectados a redes LPWA. Estas redes, que foram apresentadas comercialmente pela primeira vez em 2009 (SIGFOX, 2018), têm se tornado cada vez mais populares tanto no âmbito comercial quanto no acadêmico. Reconhecendo seu potencial de crescimento e a sua diversidade de aplicações, o presente trabalho propõe um estudo detalhado das redes LPWA através da implementação de um enlace de rádio para realização de uma análise prática do seu protocolo de comunicação.

Dentre as implementações comerciais de redes LPWA, segundo (PASQUA, 2018), destacam-se a Sigfox, LoRa/LoRaWAN e NB-IoT. Tendo em vista o crescente aumento de popularidade da rede LoRaWAN no mercado IoT, opta-se pela realização de uma análise com base neste protocolo. Essa escolha é realizada devido à disponibilidade e na praticidade de implementação de um enlace de rádio LoRa. Além disso, o protocolo de comunicação aberto e a diversidade de configurações e aplicações possíveis da rede LoRaWAN permite com que a análise seja realizada de maneira mais completa.

Neste trabalho, primeiramente, é implementado um dispositivo transmissor capaz de realizar a modulação LoRa e *gateway* capaz de receber pacotes desta mesma rede, a fim de criar um enlace de rádio. Ambos o *gateway* e o dispositivo são equipados com a pilha de protocolo LoRaWAN e uma variação do encaminhador de pacotes (para o servidor da

rede) fornecido pela Semtech, desenvolvido de maneira aberta inicialmente. O *gateway* é registrado para operar na rede pública *The Things Network*, que possui capacidade de receber e processar os pacotes LoRaWAN, disponibilizando uma interface gráfica para visualização da carga útil de aplicação.

Feita a validação do funcionamento de ambos o enlace de rádio e do servidor, é realizada uma análise da camada física proprietária LoRa. Para tal, é utilizado um rádio definido por *software* (SDR) para a captura da forma de onda dos sinais transmitidos. Devido a diversidade e flexibilidade fornecida pelos transceptores LoRa, são capturados sinais com diferentes fatores de espalhamento e, conseqüentemente, taxas de dados e formas de onda distintas. Estes sinais serão analisados subsequentemente, buscando fornecer um maior entendimento do funcionamento desta técnica proprietária que permite longo alcance com baixo consumo energético.

Finalmente, é realizado um experimento de análise de coexistência da rede LoRaWAN. Para tal é utilizado um gerador de sinais de rádio frequência a fim de interferir com os sinais LoRa gerados pelo transceptor. Tendo em vista a natureza fechada da demodulação dos sinais no receptor, a performance do protocolo é avaliada no servidor da rede (a nível da camada MAC) após a demodulação do sinal e aplicação da correção de erros na camada física. A análise de performance se dá através da taxa de erro de pacotes (PER), ou seja, aqueles no qual a mensagem da camada MAC possui erros em função da relação sinal ruído na entrada do receptor. O experimento é repetido para diversos fatores de espalhamento e diversas configurações de potência do sinal interferente.

O presente trabalho está organizado como segue. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado na realização do trabalho. No Capítulo 3 encontram-se os materiais utilizados para a realização da análise, assim como a metodologia adotada para a realização do trabalho. O Capítulo 4 fornece a descrição dos experimentos realizados, assim como uma análise dos resultados. Finalmente, no Capítulo 5 encontram-se as conclusões.

2 Referencial Teórico

2.1 Redes *Low Power Wide Area*

As redes Low-Power Wide Area (LPWA) são redes que tem como principal característica a transmissão de dados sobre longas distâncias mantendo o consumo energético dos dispositivos transmissores baixo. Para atingir essas características, essas redes assumem diversos compromissos que resultam em limitações, principalmente, na taxa de transmissão de dados, na quantidade de informação transmitida por mensagem, na taxa cíclica do rádio e na qualidade de serviço oferecida. No entanto, essas limitações tornam redes LPWA ideais para comunicações *Machine-to-Machine* (M2M) voltadas a Internet das Coisas (IoT) onde os sensores e aplicações necessitam enviar pequenas quantidades de dados a longas distâncias poucas vezes ao dia (LORA-ALLIANCE, 2015).

A maioria das tecnologias LPWA existentes no mercado opera em bandas não licenciadas *Sub-GHz*, o que apresenta duas grandes vantagens. A primeira é que, quando comparado a frequências mais altas (i.e. 2,4 GHz), os sinais na banda *Sub-GHz* sofrem menor atenuação em pequena escala devido a propagação de caminhos múltiplos causada por obstáculos no caminho do sinal (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). A segunda é que as operadoras não precisam adquirir licenças para operar, resultando na redução de custos para o consumidor. Contudo, dispositivos que operam no espectro não licenciado estão sujeitos a regulamentações locais que impõe restrições sobre alguns parâmetros como a taxa cíclica de rádio e o tempo no ar dos pacotes transmitidos.

A camada física das redes LPWA, responsável pela transmissão dos dados no meio eletromagnético, é projetada para obter um *link budget* de 150 ± 10 dB. Isso significa que o sinal enviado pelo transmissor possui um orçamento de potência de 150 ± 10 dB para chegar ao receptor e ser demodulado corretamente, o que permite um alcance de alguns quilômetros em zonas urbanas e até de dezenas de quilômetros em linha de visada (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Isso se deve a um conjunto de fatores. A sensibilidade dos receptores projetados para tecnologias LPWA, que dita a potência mínima do sinal recebido para que este possa ser demodulado corretamente, pode chegar a valores de -130 dBm (podendo ser ainda maior em algumas implementações). Esse valor é considerado alto quando comparado com a sensibilidade dos receptores de tecnologias sem fio padrão. A alta sensibilidade das redes pode ser atribuída a taxa de modulação reduzida adotada por essas tecnologias que faz com que a energia associada a cada símbolo (ou bit) seja maximizada (LINK LABS, 2016).

A arquitetura dessas redes é projetada de modo a favorecer o baixo consumo energético. Devido ao já existente alto alcance das redes LPWA, uma topologia de estrela é adotada pela grande maioria das operadoras. Nessa topologia, cada dispositivo transmissor (nó) conecta-se com a estação rádio base (ERB) (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017) em apenas um salto, não havendo comunicação direta entre os nós transmissores. A topologia de estrela não apenas reduz a complexidade do protocolo de comunicação, mas também garante que não seja necessária a transmissão de dados entre nós. Em uma topologia de malha, por exemplo, as mensagens enviadas são recebidas por outros nós na rede e reencaminhadas até que estas cheguem à ERB (ou ao endereço final de destino da mensagem), sendo necessário múltiplos saltos. Isso faz com que cada dispositivo na rede seja capaz de receber e reencaminhar pacotes que na maioria dos casos não estão endereçados a estes, aumentando o consumo energético e a complexidade do protocolo de comunicação. Portanto, quando comparada com uma topologia de malha a topologia de estrela possui uma complexidade reduzida e apresenta vantagens energéticas, pois cada nó é responsável apenas pelas suas transmissões.

Atualmente, existem diversas tecnologias LPWA proprietárias no mercado e estima-se que até o ano de 2025 cerca de 7 bilhões de dispositivos M2M/IoT estejam conectados através destas (NOKIA, 2016). Segundo (PASQUA, 2018), as tecnologias NB-IoT, Sigfox e LoRaTM são as mais populares em termos usuários e ecossistema de suporte. As subseções abaixo apresentam uma visão geral de cada uma dessas tecnologias a fim de demonstrar os diferentes *tradeoffs* adotados e fornecer uma noção das diferentes aplicações para qual estas são adequadas.

2.1.1 Sigfox

A Sigfox foi a primeira rede LPWA proposta no mercado de IoT, em 2009. Sua camada física faz uso da modulação *differential binary phase shift keying* (DBPSK) a taxas de 100 bps ou 600 bps (dependendo das regulamentações locais) no espectro não licenciado Sub-GHz. Sua modulação permite alta eficiência espectral, pois possui uma banda de transmissão de 100Hz à 100bps e 600 Hz à 600bps, sendo classificada como *ultra-narrow band* (UNB). Por ser UNB, a Sigfox oferece alta resiliência contra interferência e a sensibilidade dos receptores de suas ERBs é alta, podendo chegar a -142 dBm nas regiões onde a transmissão é realizada a 100 bps (SIGFOX, 2018). Apesar de apresentar grandes vantagens, a modulação UNB utilizada pela rede pode ser o gargalo de diversas aplicações devido às limitações impostas na carga útil.

O protocolo de comunicação utilizado é proprietário, porém recentemente a empresa tornou pública as especificações do mesmo (SIGFOX, 2019). O enlace de rádio é bidirecional e possui o número de mensagens diárias limitadas para atender as regulamentações do espectro não licenciado impostas pela ETSI (orgão regulador europeu). As mensagens

uplink são limitadas a 140 por dia e possuem uma carga máxima de 26 *bytes*, sendo 12 destes disponibilizados a aplicação do usuário e 14 reservados ao protocolo. Estas são transmitidas conforme a necessidade do dispositivo (MAC baseado em ALOHA) e não há suporte para *acknowledgements*. A fim de aumentar a confiabilidade a rede faz uso de redundância (3 transmissões para cada pacote ordenado) e diversidade de frequência e tempo. As mensagens de *downlink* (enviadas da ERB ao nó transceptor) são limitadas a 4 por dia e possuem 8 *bytes* disponíveis ao usuário (SIGFOX, 2018).

2.1.2 NB-IoT

NB-IoT é um padrão desenvolvido pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) como parte do *Release 13* lançado em 2016, que visa fornecer conectividade de longo alcance a dispositivos IoT (WANG et al., 2016). Diferentemente de tecnologias como Sigfox e LoRa, este padrão que surgiu como uma resposta das grandes operadoras celulares ao crescimento de tecnologias LPWAN faz uso de uma camada física mais sofisticada e opera no espectro licenciado. Dentre as suas principais vantagens encontram-se o baixo consumo energético e o baixo custo dos componentes (LABS, 2018).

Sua camada física opera com a modulação *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) em uma largura de banda de 200kHz. Quanto a utilização do espectro licenciado, a rede NB-IoT pode operar em três configurações diferentes. A primeira é a utilização de bandas licenciadas unicamente para sua utilização. A segunda consiste na utilização de canais de 200kHz que foram previamente utilizadas por padrões como GSM ou CDMA. A terceira, e última, configuração consiste na alocação de um bloco de recursos em estações rádio base ou nas bandas de guarda LTE para sua operação (LABS, 2018).

2.1.3 LoRaWAN

A rede LoRaWAN é uma rede LPWA cujo protocolo de comunicação e a arquitetura da rede abertos e desenvolvidos em cima da camada física LoRa (*Long Range*). A camada física conhecida como LoRa foi criada pela empresa Cycleo e adquirida pela Semtech (SEMTECH, 2012). Essa camada física faz uso de uma modulação proprietária que baseia-se em conceitos da modulação *Chirp Spread Spectrum*, desenvolvida para aplicações em radares nos anos de 1940 (SEMTECH, 2015). As camadas superiores do protocolo (MAC e Aplicação) são abertas e mantidas pelo comitê técnico da LoRa-Alliance, uma associação aberta e sem fins lucrativos formada por mais de 500 empresas (SORNIN et al., 2016).

A rede LoRaWAN explora o espectro não regulado ISM e faz diversos *tradeoffs* entre taxa de dados e tamanho da carga útil de seus *frames*, visando sempre aumentar o alcance da rede. Os detalhes desta rede serão elaborados nas próximas seções deste

trabalho. O Quadro 1 apresenta uma comparação das principais características de cada uma das redes apresentadas nas Seções 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3.

Tabela 1 – Tabela comparativa entre as principais características das redes LPWA LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT.

Característica	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT
Modulação	LoRa (SS Chirp)	GFSK/BPSK	QPSK
Frequência de Operação	Sub-GHz ISM	Sub-GHz ISM	Espectro Licenciado LTE
Taxa de Dados	290 bps - 50 kbps	100bps (uplink) 600bps (downlink)	200kbps
Máx Carga útil	242 bytes	12 bytes (uplink) 8 bytes (downlink)	1600 bytes
Máx Mensagens/dia	Ilimitado	140 (uplink) 4 (downlink)	Ilimitado
Direcionalidade	Bidirecional	Bidirecional Limitado	Bidirecional
Alcance Máximo	5km (urbano) 20km (rural)	10km (urbano) 40km (rural)	1km (urbano) 10km (rural)
Encriptação	AES-128	Não encriptado	Encriptação LTE
Handover	Não necessário	Não necessário	Necessário
Geolocalização	Sim (TDoA)	Sim (RSSI)	Não documentado
Imunidade à Interferência	Muito Alta	Muito Alta	Baixa

Fonte – Adaptado de (LORA-ALLIANCE, 2015) e (MEKKI et al., 2019).

2.2 A Camada Física LoRa

LoRa é uma modulação proprietária desenvolvida para aplicações de baixo custo, longo alcance, baixa potência e de baixa taxa de dados criada pela Semtech em 2012 (SORNIN et al., 2016). A modulação é de espectro espalhado e é uma derivação da modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) que implementa taxa de dados variável através da utilização de diferentes fatores de espalhamento ortogonais em uma largura de banda fixa (SEMTECH, 2015). Os *chirps* gerados na modulação LoRa são sinais que variam continuamente com a frequência, mas mantém a continuidade de fase constante ao longo da transmissão. Desse modo, a modulação LoRa permite que os nós e os *gateways* realizem sincronização de frequência e tempo de uma maneira mais simples e barata (CENTENARO et al., 2016).

A taxa de dados nominal da modulação LoRa varia de acordo com a largura de banda da modulação, o fator de espalhamento (SF) e a taxa de código. O fator de

espalhamento é o número de bits codificados por símbolo e pode variar de 7 a 12. Segundo (LORA-ALLIANCE, 2015) as formas de onda criadas com diferentes valores de SF são ortogonais, permitindo que o receptor as demodule independentemente mesmo quando superpostas. A largura de banda de modulação (BW), na rede LoRaWAN, pode ser de 125kHz, 250kHz ou 500kHz a depender da direção da mensagem (*uplink* ou *downlink*) e da região de operação. A taxa de código (CR) é referente à correção de erros em avanço (FEC) adotado pela modulação LoRa para aumentar a robustez do sinal transmitido e pode variar de 1 a 4, sendo cada um desses valores um código para o valor real da taxa de códigos. Um valor de CR = 1 equivale à uma taxa de código de 4/5, CR = 2 equivale a 4/6, CR = 3 equivale a 4/7 e CR = 4 equivale a 4/8. Desse modo, a depender da região e dos parâmetros selecionados, a taxa de dados pode variar de 0,3 kbps a 50 kbps (SORNIN et al., 2016).

Matematicamente, segundo (SEMTECH, 2015), é possível derivar a taxa de bits, símbolos e *chips* da modulação LoRa. Inicialmente, a taxa de bits pode ser definida pela equação 2.1 abaixo, em bits por segundo (bps).

$$R_b = SF \left(\frac{1}{2^{SF}} \right) \quad [\text{bps}] \quad (2.1)$$

Da equação 2.1, podem ser definidos o período de símbolo (T_s) em segundos e, analogamente, a taxa de símbolo (R_s) em símbolos por segundo (*symbols/sec*). As equações 2.2 e 2.3 abaixo representam T_s e R_s , respectivamente.

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad [\text{s}] \quad (2.2)$$

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad [\text{símbolos/s}] \quad (2.3)$$

Das equações 2.2 e 2.3 observa-se que cada símbolo, composto de SF bits possui um total de 2^{SF} *chips* que ocupam uma largura de banda BW. Seguindo o raciocínio dado por (SEMTECH, 2015), é possível derivar a taxa de *chips*. As equações 2.4 e 2.5 representam a derivação da taxa de *chips* (R_c) da modulação LoRa.

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF} \quad (2.4)$$

$$R_c = \frac{BW}{2^{SF}} \cdot 2^{SF} = BW \quad [\text{chips/s}] \quad (2.5)$$

A partir da equação 2.5 nota-se então que a modulação LoRa espalha os dados a uma taxa de *chips* igual à largura de banda escolhida. Desse modo, é possível afirmar que

um *chip* é enviado por segundo por Hertz de banda. Portanto, uma largura de banda de 250 kHz, por exemplo, equivale a uma taxa de chips de 250 kcps (SEMTECH, 2013).

Finalmente, a modulação inclui ainda métodos de FEC a fim de fornecer maior robustez ao sinal transmitido (SEMTECH, 2015). Desse modo, para uma dada taxa de código (CR) tem-se que a taxa de bits nominal é dada pela equação 2.6 abaixo.

$$R_b = SF \left(\frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}}} \right) \quad [\text{bps}] \quad (2.6)$$

É possível, ainda, calcular o tempo no ar das mensagens LoRa a partir do período de cada um dos símbolos e do número destes. O tempo no ar de um pacote LoRa é dado pela soma do período do preâmbulo com o período da carga útil, como mostra a equação 2.7 (SEMTECH, 2019b).

$$T_s = T_{\text{preâmbulo}} + T_{\text{payload}} \quad [\text{s}] \quad (2.7)$$

O período do preâmbulo depende do número de símbolos utilizados para este e pode ser calculado a partir da equação 2.8 abaixo. A variável $n_{\text{preâmbulo}}$ representa o número de símbolos utilizados no preâmbulo e T_s é dado pela equação 2.2.

$$T_{\text{preâmbulo}} = (n_{\text{preâmbulo}} + 4, 25) \cdot T_s \quad [\text{s}] \quad (2.8)$$

O período da carga útil pode ser calculado pela equação 2.9. A variável n_{payload} denota o número símbolos da carga útil e é dada pela equação 2.10. Na equação 2.10 a variável PL representa o número de *bytes* presentes na carga útil. IH representa a presença explícita (IH = 0) ou ausência (IH = 1) do cabeçalho do pacote e DE representa a presença (DE = 1) ou ausência (DE = 0) de uma otimização da taxa de dados denominada. A obrigatoriedade da presença (DE = 1) da otimização de taxa de dados se dá quando $T_s \geq 16$ ms.

$$T_{\text{payload}} = n_{\text{payload}} \cdot T_s \quad [\text{s}] \quad (2.9)$$

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max \left(\text{teto} \left[\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right] \cdot (CR + 4), 0 \right) \quad (2.10)$$

Segundo (SEMTECH, 2015) e tendo em mente a rede LoRaWAN, as principais características da camada física LoRa são:

Resistência à atenuação e múltiplos caminhos: devido à banda relativamente larga dos pulsos *chirp*, a modulação LoRa oferece imunidade a múltiplos caminhos e

atenuações em pequena escala quando comparado a outros sistemas. Desse modo, a modulação apresenta vantagens em ambientes repletos de obstáculos (urbanos) e também em ambientes rurais.

Resistência ao efeito Doppler: devido a configuração dos chirps da modulação LoRa, os desvios em frequência ocasionados pelo efeito Doppler são negligenciáveis quando computados no eixo temporal do sinal na banda de base. Essa característica faz com que a LoRa possa ser utilizada em aplicações onde o dispositivo é móvel.

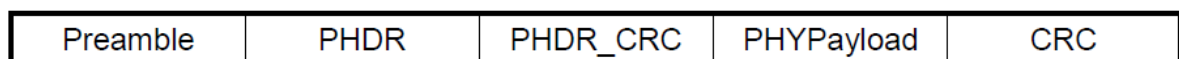
Grande Capacidade de Rede: os fatores de espalhamentos empregados na modulação LoRa são ortogonais. Desse modo, múltiplos sinais podem ser transmitidos em um mesmo canal sem que haja uma degradação significativa na sensibilidade de recepção.

Envelope Constante e Baixo Consumo Energético: a modulação LoRa, assim como modulações como FSK e PSK, é uma modulação de envelope constante, ou seja, não há modulação na amplitude do sinal. Isso faz com que os mesmos estágios do amplificador de potência da modulação FSK, que são de baixo custo, baixa potência e alta eficiência, possam ser reutilizados sem modificação. No entanto, devido ao ganho de processamento associado à modulação LoRa, o *link budget* de sinais LoRa continua sendo maior (ou equivalente, à depender da configuração adotada) ao da modulação FSK, mesmo quando transmitido com potências inferiores.

2.2.1 Formato das Mensagens *Uplink*

Na rede LoRaWAN, as mensagens de *uplink* são enviadas de um nó ao servidor da rede, sendo entregues para o último por todos os *gateways* que a receberam (SORNIN et al., 2016). Esses pacotes são compostos por um preâmbulo de sincronização (*preamble*), um cabeçalho da camada física LoRa (LoRa *physical header*, PHDR) e uma carga útil denominada de PHYPayload. Devido a criticidade da informação presente no cabeçalho da mensagem, este possui um CRC próprio de 16 bits denominado de PHDR_CRC. Desse modo, ao receber o pacote o *gateway* valida primeiro este cabeçalho antes de seguir para a demodulação da informação. Para garantir a integridade da PHYPayload da mensagem é incluído um CRC de 16 bits sobre esta, porém este é opcional. A Figura 1 mostra a composição da mensagem.

Figura 1 – Composição das mensagens *uplink* da camada física.



Fonte – (SORNIN et al., 2016).

O PHDR é um campo opcional que, quando presente, é denominado cabeçalho explícito e indica o tamanho da PHYPayload, a taxa de código (CR) e a presença ou não do CRC aplicado na PHYPayload. No modo cabeçalho explícito, este é transmitido com CR máxima (4/8) e o CRC associado a ele (PHDR_CRC) aumenta a robustez da mensagem, permitindo que o receptor descarte cabeçalhos inválidos (SEMTECH, 2019b). Na rede LoRaWAN a presença de um cabeçalho explícito é obrigatória. Se o PHDR não estiver presente, diz-se que a mensagem possui um cabeçalho implícito. No modo de cabeçalho implícito ambos as pontas do enlace de rádio devem estar previamente cientes do tamanho da PHYPayload, CR e da presença ou não de um CRC. A camada física LoRa é responsável pelo PHDR, PHDR_CRC e CRC enquanto os campos PHYPayload e o tamanho do preâmbulo de sincronização são fornecidos pela camada MAC.

2.2.2 Formato das Mensagens *Downlink*

No contexto da LoRaWAN, as mensagens de *downlink* são enviadas de um único *gateway* diretamente a um único nó. O servidor da rede é responsável por detectar e decidir qual é o melhor *gateway* que irá transmitir a mensagem de *downlink*. A decisão do *gateway* responsável pela entrega das mensagens de *downlink* se baseia em fatores de qualidade do sinal, como RSSI e SNR. Como apresentado na Figura 2, as mensagens de *downlink* são compostas de um preâmbulo (*preamble*) de sincronização, um cabeçalho da camada física LoRa (PHDR) e seu respectivo CRC (PHDR_CRC) e a carga útil PHYPayload. Os campos PHDR e PHDR_CRC são de interesse cada camada física LoRa, enquanto que a carga útil é passada para a camada de controle de acesso de meio (MAC).

Figura 2 – Composição das mensagens *downlink* da camada física.



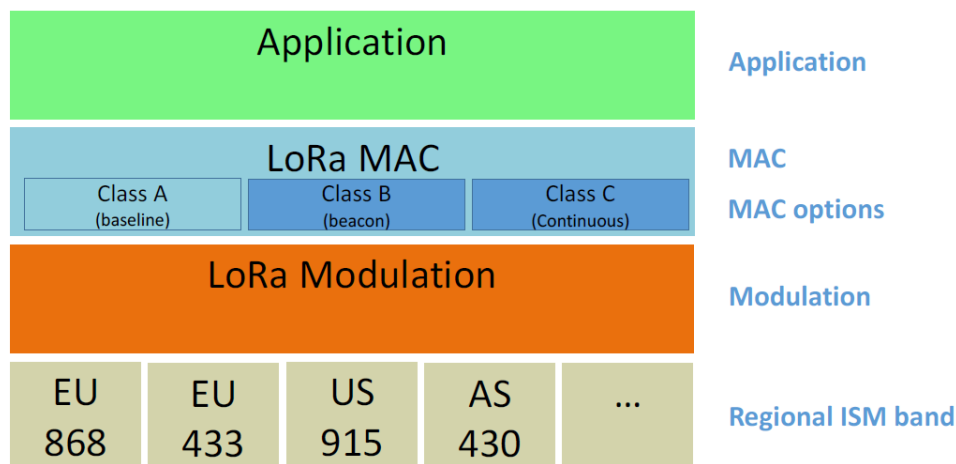
Fonte – (SORNIN et al., 2016).

2.3 A Rede LoRaWAN

LoRaWAN é o protocolo de comunicação aberto e a arquitetura de rede desenvolvidos em cima da camada física LoRa pela LoRa-Alliance, uma associação aberta e sem fins lucrativos composta de mais de 500 empresas e controlada pela IBM, Actility, Semtech e Microchip (SORNIN et al., 2016). LoRa, por sua vez, é uma camada física proprietária desenvolvida pela Semtech. A combinação de ambos forma a pilha de protocolo que será tratada neste trabalho como rede LoRaWAN. É importante notar que a camada física LoRa não está obrigatoriamente atrelada à LoRaWAN, permitindo assim que outros

protocolos de comunicação possam ser desenvolvidos para esta. A Figura 3 representa a pilha de protocolo da rede LoRaWAN.

Figura 3 – Pilha de protocolo da rede LoRaWAN.



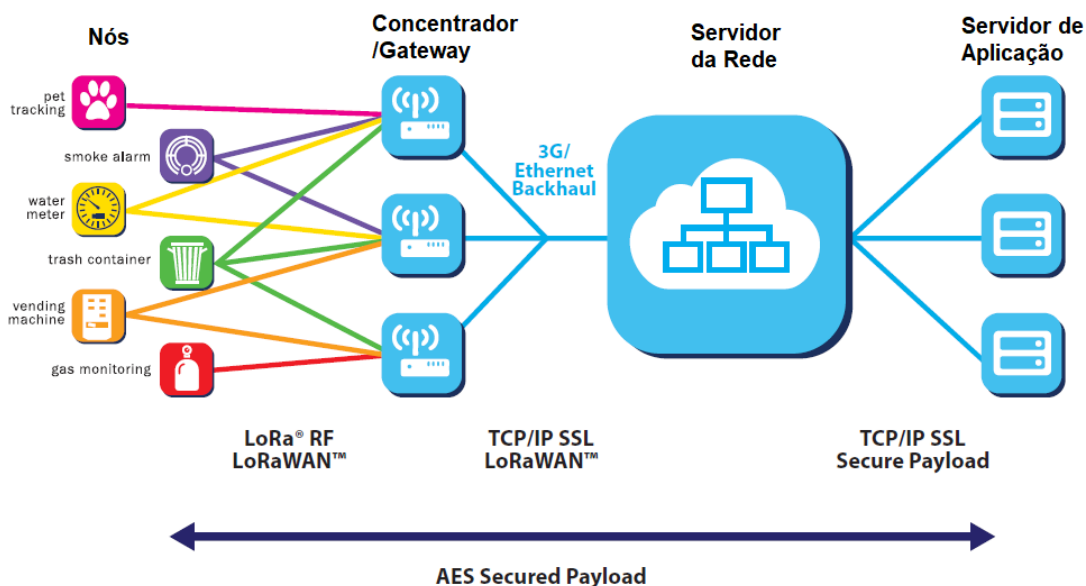
Fonte – (SORNIN et al., 2016).

2.3.1 Arquitetura da Rede

Conforme mostra a Figura 4 a rede LoRaWAN possui quatro componentes principais: os nós (*end-nodes*), os *gateways*, o servidor da rede e o servidor de aplicação. Os nós são dispositivos transceptores que estão, geralmente, acoplados a um sensor. Na rede LoRaWAN, os nós não estão associados a um *gateway* específico e, portanto, os dados enviados por um nó podem ser recebidos por um ou mais *gateways* através do enlace de rádio LoRa em um salto único (CENTENARO et al., 2016) (LORA-ALLIANCE, 2015). Cada um dos *gateways*, por sua vez, encaminha o pacote recebido ao servidor da rede, que irá filtrar pacotes redundantes, realizar procedimentos de segurança, fazer o agendamento de *acknowledgements* através de um *gateway* ótimo, etc (LORA-ALLIANCE, 2015).

Essa topologia adotada pela rede LoRaWAN é referida como "estrela-de-estrelas", visto que todos os *gateways* no alcance de um nó estão aptos a receber qualquer pacote enviado e encaminhá-lo ao servidor da rede para autenticação. Isso faz com que os *gateways* sejam apenas demoduladores que encaminham pacotes sem que haja nenhuma verificação de identidade. Nessa topologia, portanto, os *gateways* são transparentes aos nós, pois a conexão é estabelecida diretamente entre o servidor da rede e o nó. Desse modo a "inteligência" e complexidade da rede é passada completamente ao servidor, tornando o protocolo leve do ponto de vista dos transceptores (LORA-ALLIANCE, 2015).

Figura 4 – Arquitetura da rede LoRaWAN.



Fonte – Adaptado de (LORA-ALLIANCE, 2015).

2.3.2 A Camada de Controle de Acesso de Meio

A camada MAC (LoRaWAN) foi desenvolvida pela LoRa-Alliance permite diversas configurações de dispositivos, a depender da aplicação a ser implementada. O controle de acesso de meio utiliza um método conhecido comumente como ALOHA (LORA-ALLIANCE, 2015), onde cada dispositivo envia dados de maneira assíncrona conforme a necessidade ou em intervalos pré-definidos, sem que haja sensoramento do canal. Não há limitações quanto ao número de mensagens enviadas, contanto que estas sejam enviadas em canais de frequência diferentes, seguindo uma ordem pseudo-aleatória (SORNIN et al., 2016). Esse padrão de diversificação de frequência faz com que a LoRaWAN seja compatível com as regulamentações do espectro não licenciado, possua uma capacidade maior e seja mais robusta a interferências.

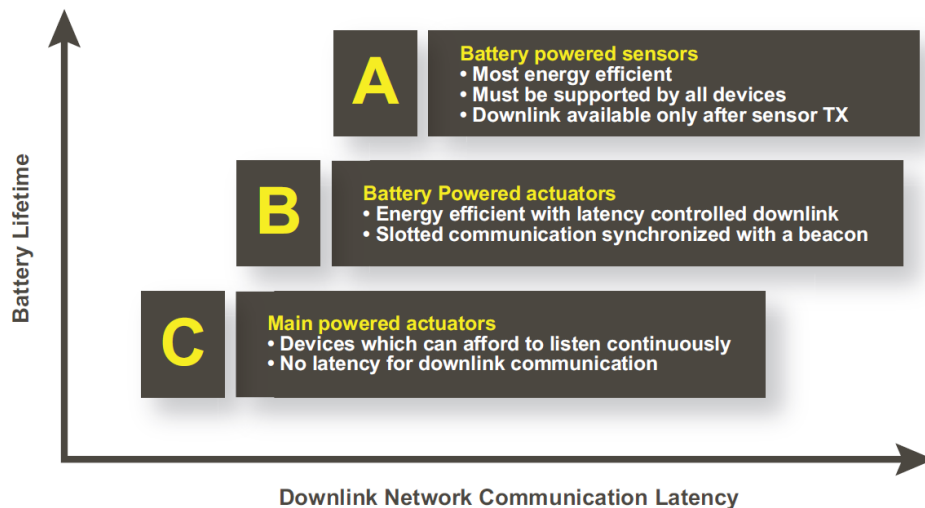
Visando maximizar a capacidade da rede, a LoRaWAN implementa um esquema de taxa de dados e potência adaptativas, sendo opcional aos usuários. Quando ativado nos dispositivos finais, este esquema permite com que a rede exerça um controle maior sobre os dispositivos. A taxa de dados dos nós pode ser controlada através de modificações no fator de espalhamento. A redução do tempo em que os sinais ficam no ar, combinada com *gateways* capazes de receber sinais com diferentes taxas de dados simultaneamente garantem a alta capacidade e escalabilidade da rede (LORA-ALLIANCE, 2015). Além disso, do ponto de vista dos nós, o aumento da taxa de dados e a redução da potência de transmissão quando este está perto de um *gateway* resulta em um menor consumo

energético. Desse modo, as técnicas de taxa de dados e potência adaptativas se tornam mutuamente benéficas aos componentes da rede.

Classes de Dispositivo

A LoRaWAN divide os dispositivos presentes na rede em três diferentes classes. Estas classes apresentam *tradeoffs* entre a quantidade de janelas de *downlink* abertas e seu consumo energético. A quantidade de janelas de *downlink* abertas está diretamente relacionada com a latência de comunicação entre o servidor e o nó. A Figura 5 apresenta graficamente a relação entre o consumo energético dos nós de cada classe e sua latência de comunicação. Segundo (SORNIN et al., 2016) as diferentes classes de dispositivo são:

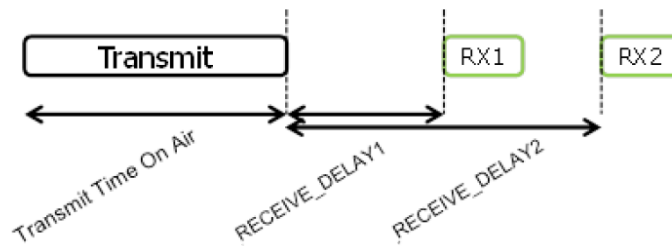
Figura 5 – Comparação da latência versus consumo energético de diferentes classes de dispositivos.



Fonte – (LORA-ALLIANCE, 2015).

Classe A: Essa classe está implementada em todos os dispositivos LoRaWAN. Nela, o enlace de rádio é bidirecional, no entanto as janelas de recepção são limitadas. Para cada mensagem *uplink* transmitida pelo dispositivo são abertas duas janelas de recepção nas quais o dispositivo está ativamente buscando o preâmbulo de pacotes de *downlink*. Desse modo, as mensagens de *downlink* enviadas ao servidor da rede (advindas da camada de aplicação) só serão transmitidas ao nó no momento em que este enviar uma mensagem *uplink*. A temporização das janelas de recepção RX1 e RX2 é apresentada na Figura 6. Essa classe possui o menor consumo energético, visto que minimiza o tempo em que o dispositivo deve manter o circuito de recepção ativo.

Figura 6 – Diagrama de representação da abertura das janelas de recepção nos nós LoRa.



Fonte – (SORNIN et al., 2016).

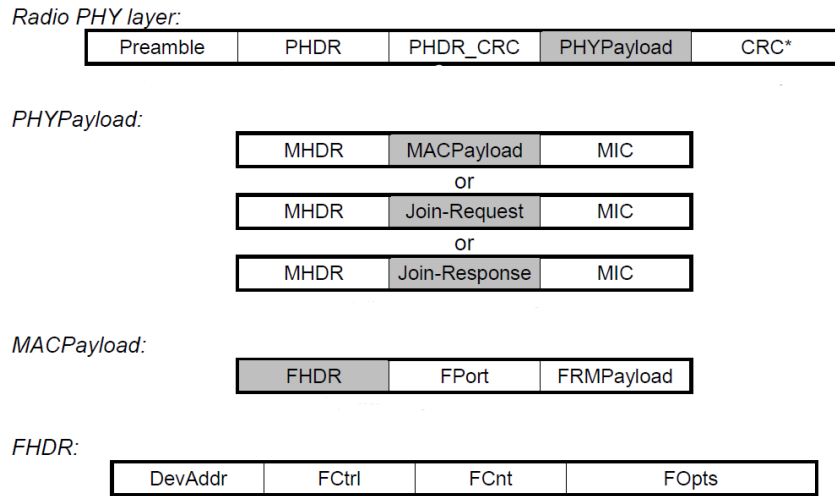
Classe B: Os dispositivos nesta classe implementam o mesmo funcionamento dos dispositivos da Classe A. No entanto, estes permitem a abertura de um maior número de janelas de *downlink* através de um agendamento prévio. Para que um determinado nó saiba quando a janela deve ser aberta, o servidor envia um *beacon* de sincronização temporal entre o nó e o servidor. Isso faz com que ambos o servidor e o nó saibam quando um *downlink* será enviado. Essa classe possui um consumo energético mais elevado, visto que faz uso de mais janelas de *downlink*. Contudo, sua latência é reduzida.

Classe C: Os nós pertencentes a essa classe possuem janelas de *downlink* quase que continuamente abertas, sendo fechadas apenas quando há transmissão de mensagens *uplink*. Isso faz com que a latência de comunicação entre o servidor e o nó seja reduzida significativamente ao custo de um elevado consumo energético.

Formato das Mensagens MAC

Como mencionado na Seção 2.2, a única parte dos pacotes que é repassada pela PHY é a porção da mensagem transmitida que está contida na PHYPayload. A rede LoRaWAN implementa uma estrutura que faz uso desta fração do pacote para transmissão de dados e configurações das camadas superiores. A PHYPayload é dividida em um cabeçalho MAC (*MAC header*, MHDR), uma carga útil denominada de MACPayload que varia de acordo com as informações presentes no MHDR e um código de integridade de mensagem (MIC), utilizado tanto na verificação da integridade quanto na autenticação da mensagem no servidor da rede. O MIC é um código calculado a partir de um *cypher-based message authentication code* (CMAC), utilizando uma chave de encriptação conhecida como NwkSKey e um bloco de cifra. O diagrama de expansão presente na Figura 7 representa cada um dos blocos pertencentes a um pacote LoRa utilizado na rede LoRaWAN.

Figura 7 – Diagrama de expansão da estrutura de uma mensagem LoRaWAN.



Fonte – (SORNIN et al., 2016).

O campo MHDR, como mostra a Figura 8, é composto por um único octeto que especifica o tipo de mensagem (MType) e o dígito mais significativo da versão do protocolo LoRaWAN utilizada para construir o *frame* (*Major*). O campo MType distingue entre seis possíveis tipos de mensagem: *join request*, *join accept*, dados *uplink* ou *downlink* com confirmação e dados *uplink* ou *downlink* sem confirmação. As mensagens do tipo *join request* e *join accept* são discutidas nas seções subsequentes.

Figura 8 – Estrutura do MHDR.

Bit#	7..5	4..2	1..0
MHDR bits	MType	RFU	Major

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

Para as mensagens de dados a carga útil é denominada de MACPayload. Esta é dividida em um cabeçalho denominado de *frame header* (FHDR), que possui até 22 octetos e uma porta de um octeto denominada de FPort. O campo FPort é destinado para identificação dos conteúdos da FRMPayload, sendo os valores 1 a 223 completamente customizáveis pelo usuário. Os valores de FPort = 0 ou FPort \geq 224 são reservados pela LoRaWAN e são utilizados para o gerenciamento da rede. A carga útil de aplicação é chamada de FRMPayload e tem um tamanho máximo que depende da região de operação e da taxa de dados utilizada pelo nó. A FRMPayload é onde se encontram os dados que o

usuário deseja transmitir na rede LoRaWAN. O campo FHDR é responsável ainda por uma série de parâmetros como mostra a Figura 9. As seguintes subseções compõem o FHDR:

Figura 9 – Estrutura do FHDR.

Size (bytes)	4	1	2	0..15
FHDR	DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

DevAddr: É um endereço de 32 bits utilizado para a identificação do dispositivo dentro da rede. Os 7 primeiros bits mais significantes são o identificador da rede (*Network Identifier*) e indicam o operador da rede que está sendo utilizada. Os outros 25 bits representam o endereço do dispositivo na rede (*Network Address*). A Figura 10 exemplifica a estrutura do DevAddr.

Figura 10 – Estrutura do DevAddr.

Bit#	[31..25]	[24..0]
DevAddr bits	NwkID	NwkAddr

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

FCtrl: Esse campo é denominado de *Frame Control* e contém informações de controle que são trocadas entre o servidor da rede e o nó. Ele é diferente para mensagens *uplink* e *downlink*. A estrutura do FCtrl está representada na Figura 11 e seus subcampos estão descritos abaixo:

Figura 11 – Diferentes subcampos do FCtrl.

For downlink frames the FCtrl content of the frame header is:					
Bit#	7	6	5	4	[3..0]
FCtrl bits	ADR	RFU	ACK	FPending	FOptsLen

For uplink frames the FCtrl content of the frame header is:					
Bit#	7	6	5	4	[3..0]
FCtrl bits	ADR	ADRACKReq	ACK	RFU	FOptsLen

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

ADR (*Adaptive Data Rate*): Este bit refere-se a taxa de dados adaptativa e está contido tanto em mensagens *uplink* quanto em mensagens *downlink*. Quando

o bit for 1 o servidor da rede irá se encarregar do gerenciamento da taxa de dados, buscando sempre utilizar a taxa de dados mais rápida possível.

ADRACKReq (*ADR Acknowledgement Request*): É utilizado apenas em mensagens *uplink* quando um nó possui a taxa de dados adaptativa ativada. Nós que fazem uso da ADR necessitam confirmar periodicamente de que suas mensagens estão sendo recebidas pelo servidor. Desse modo, caso não haja recepção de *downlinks* em um determinado período o nó ativa este bit para requisitar um *downlink* de *acknowledgement* da rede.

ACK (*Acknowledgement*): Quando mensagens de dados confirmadas são enviadas tanto *uplink* ou *downlink*, o receptor deve responder imediatamente com um *acknowledgement*. Nesses casos, portanto, o bit ACK será ativado.

Fpending (*Frame Pending*): Presente apenas em pacotes *downlink*, a ativação deste bit indica que há mais uma mensagem de *downlink* na fila. Portanto, o nó deve enviar um *uplink* em seguida para que novas janelas de recepção sejam abertas.

FOptsLen (*Frame Options Length*): Indica a quantidade de FOpts que estão sendo transmitidas no FHDR.

FOpts: Denominado de *Frame Options*, esse campo pode conter até 15 octetos. Esses octetos representam comandos da camada MAC que são utilizados pelo servidor para melhor gerenciar a rede.

FCnt: O *Frame Counter* é utilizado para realizar a contagem das mensagens trocadas. Esse campo é independente para mensagens *uplink* e *downlink*, ou seja, a contagem é realizada separadamente. Mensagens *uplink* possuem uma contagem FCntUp enquanto que mensagens *downlink* possuem uma contagem FCntDown.

2.3.3 Procedimentos de Ativação dos Nós na Rede

Existem dois métodos que permitem com que dispositivos sejam ativados nas redes *LoRaWAN*. O primeiro deles é denominado de *Over-the-Air Activation* (OTAA), que consiste em um procedimento de *handshake* entre o nó e o operador da rede onde são trocadas informações pertinentes ao registro do novo dispositivo na rede. O segundo método, denominado *Activation by Personalization* (ABP), envolve a personalização direta do nó, sendo necessário que as chaves de comunicação sejam gravadas no *firmware* do mesmo. Independentemente do método de ativação escolhido pelo usuário, os seguintes parâmetros devem estar armazenados na memória do dispositivo após o procedimento de ativação na rede (SORNIN et al., 2016):

Endereço do nó (DevAddr): Consiste em um endereço de 32 bits que identifica o nó dentro da rede. Seu formato está descrito na Figura 10, apresentada na subseção anterior.

Identificador de aplicação (AppEUI): É um identificador global e único da aplicação no formato IEEE EUI64. O *AppEUI* deve ser gravado no dispositivo antes do processo de ativação.

Chave de sessão de rede (NwkSKey): É uma chave específica para cada nó que é utilizada tanto pela rede quanto pelo nó para calcular o código de integridade de mensagem (MIC, do inglês). Esta chave também é utilizada para encriptar e decriptar a carga útil de mensagens que contém apenas comandos da camada MAC.

Chave de sessão de aplicação (AppSKey): É uma chave específica para cada nó que é utilizada pela rede e pelo nó para encriptar e decriptar a carga útil da aplicação (*FRMPayload*). Estas mensagens são encriptadas de ponta-a-ponta entre o nó e o servidor de aplicação, porém sua integridade não é garantida. Neste sentido, o servidor da rede pode alterar o conteúdo de mensagens em trânsito.

Ativação pelo Ar (OTAA):

O método de ativação OTAA requer que o dispositivo seja submetido a um procedimento de ativação que se dá através de uma troca de mensagens com o servidor da rede. Para tal, segundo (SORNIN et al., 2016), além da AppEUI, o dispositivo deve ser personalizado com:

Identificador do nó (DevEUI): Identificador global e único para cada dispositivo. É apresentado no formato IEEE EUI64.

Chave de Aplicação (AppKey): É uma chave-raiz no formato AES-128 utilizada para derivar as chaves de sessão AppSKey e NwkSKey.

O procedimento de ativação é dado através da troca de mensagens de *join request* e *join response* entre o nó e o servidor da rede. A inicialização do *handshake* é dada pelo nó através do envio da mensagem de *join request*. O campo PHYPayload dessa mensagem (vide Figura 7) é composto pela AppEUI, DevEUI e um DevNonce, que nada mais é que um valor aleatório. O DevNonce é utilizado como uma medida de segurança, visto que o servidor da rede não aceita mensagens *join request* que contenham este valor repetido dentro de um certo período de tempo. É importante notar que essa mensagem não é encriptada. A Figura 12 representa os campos que compõe essa mensagem.

Para que o nó seja devidamente ativado, este deve receber do servidor rede uma mensagem de *join accept*. Essa mensagem é composta por um *nonce* de aplicação (App-Nonce), um identificador da rede (NetID), o DevAddr alocado para o dispositivo, o *delay*

Figura 12 – Estrutura das mensagens de *join request*.

Size (bytes)	8	8	2
Join Request	AppEUI	DevEUI	DevNonce

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

a ser adotado para a abertura de janelas de recepção (RxDelay) e, opcionalmente, um mapa dos canais disponíveis para transmissão (CFList). O AppNonce é utilizado para derivação de chaves NwkSKey e AppSKey por ambos o servidor de rede e o nó. O NetID identifica qual o provedor da rede a qual o dispositivo está conectado. É importante notar que, por questões óbvias de segurança, a mensagem de *join accept* é encriptada. A Figura 13 exemplifica o formato dessa mensagem.

Figura 13 – Estrutura das mensagens de *join accept*.

Size (bytes)	3	3	4	1	1	(16) Optional
Join Accept	AppNonce	NetID	DevAddr	DLSettings	RxDelay	CFList

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

O campo *DLSettings* possui diretivas sobre a configuração do nó para a recepção correta de mensagens *downlink*. Ele é composto pelos campos RX1DROffset e RX2 *Data Rate*. O primeiro campo indica taxa de dados (e conseqüentemente, o fator de espalhamento) na qual o dispositivo deve esperar receber mensagens quando abre a primeira janela de recepção. Esse dado vem em forma de um *offset*, que a partir de uma tabela gera a taxa de dados de recepção baseado na taxa de dados de transmissão do nó. A tabela que dita este valor para a recepção correta de mensagens varia de acordo com cada região e é encontrada em (COMITTEE, 2017). O segundo parâmetro define a taxa de dados para a recepção de mensagens na segunda janela de recepção. A Figura 14 representa o formato deste campo da mensagem.

Figura 14 – Estrutura do campo DLSettings nas mensagens de *join accept*.

Bits	7	6:4	3:0
DLsettings	RFU	RX1DRoffset	RX2 Data rate

Fonte – (SORNIN et al., 2016).

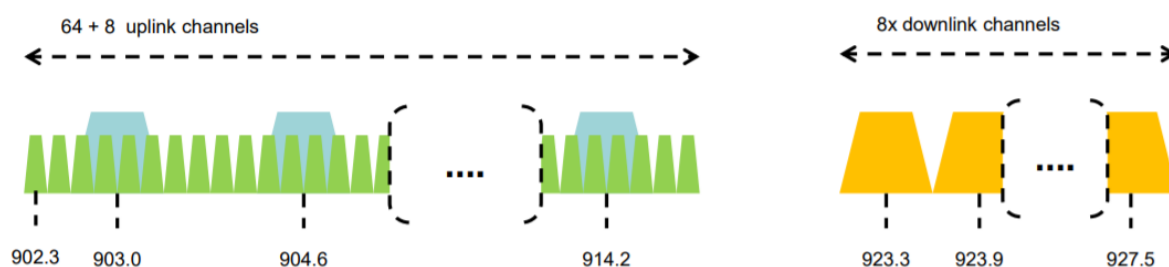
Ativação por Personalização (ABP):

Nessa modalidade não é necessário um *handshake* entre o nó e o servidor da rede. Porém, para tal, o nó deve ser personalizado com o DevAddr e as duas chaves de sessão (NwkSKey e AppSKey). Este método é mais simples do ponto de vista do dispositivo. No entanto, devem ser tomados cuidados para que não haja o comprometimento das chaves de sessão. Dentre estes cuidados, os usuários devem gerar chaves únicas para cada um dos dispositivos e estas não devem ser derivadas de informações publicamente úteis (SORNIN et al., 2016). Caso contrário, o comprometimento das chaves de um dispositivo pode comprometer a segurança dos dados de uma série de outros dispositivos.

2.3.4 Parâmetros Regionais (LoRaWAN)

A camada física LoRa foi desenvolvida para operação na banda de Aplicações Industriais, Científicas e Médicas (ISM, do inglês). No contexto da rede LoRaWAN, o Brasil se encaixa na região definida como US 902-928 MHz pela Especificação de Parâmetros Regionais LoRa (COMITTEE, 2017). Essa região define 64 canais de *uplink* com largura de banda de 125 kHz cada e espaçados de 200 kHz, e outros oito canais com largura de banda de 500 kHz espaçados de 1,6 MHz. Para mensagens de *downlink*, essa região reserva oito canais com largura de banda de 500 kHz espaçados de 600 kHz. A transmissão de mensagens pelo nó (*uplink*) deve se dar em, pelo menos, dois canais. A escolha do canal de transmissão deve ser pseudo-aleatória. A Figura 15 exemplifica a configuração dos canais.

Figura 15 – Configuração dos canais da rede LoRaWAN na região US902-9028 MHz



Fonte – (COMITTEE, 2017).

É importante notar que, no Brasil, a faixa de frequências de 907,5 MHz a 915 MHz é destinada primariamente ao Serviço Móvel Pessoal (SMP) e ao Serviço de Comunicação Multimídia (SMC) de acordo com a Resolução nº 454/2006 da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL, 2006). Devido à natureza não exclusiva da atribuição, a faixa ISM ainda pode ser considerada como sendo de 902 MHz a 928 MHz. Contudo, equipamentos que façam uso da faixa de 907,5 MHz a 915 MHz estão sujeitos a interferência adicional causadas pelo SMP e SMC.

Cada grupo de canais possui, ainda, restrições nos parâmetros da forma de onda a fim de cumprir normas dos órgãos reguladores (COMITTEE, 2017). O grupo de 64 canais *uplink* pode transmitir apenas com taxas de dados de DR0 a DR3 e taxa de código 4/5 (CR=1). O grupo de oito canais *uplink* pode transmitir apenas com taxa de dados DR4. Já o grupo de oito canais *downlink* pode transmitir com taxas de dado de DR8 a DR13. A tabela 2 mostra a configuração de cada uma das DRs descritas, além do sua taxa de dados nominal considerando os parâmetros apresentados e a Eq. 2.6.

Tabela 2 – Taxas de dados disponíveis para a região LoRaWAN US902-928 MHz

Taxa de Dados (DR)	Configuração (SF/BW)	Taxa de Dados Nominal [bps]
0	LoRa: SF10/125kHz	980
1	LoRa: SF9/125kHz	1760
2	LoRa: SF8/125kHz	3125
3	LoRa: SF7/125kHz	5470
8	LoRa: SF12/500kHz	980
9	LoRa: SF11/500kHz	1760
10	LoRa: SF10/500kHz	3900
11	LoRa: SF9/500kHz	7000
12	LoRa: SF8/500kHz	12500
13	LoRa: SF7/500kHz	21900

Fonte – Adaptado de (COMITTEE, 2017).

As regulamentações do espectro não-licenciado delimitam, ainda, que as mensagens devem ter um tempo máximo de 400 ms no ar (COMITTEE, 2017). Assim sendo, a rede LoRaWAN impõe limitações no tamanho da carga útil acessível ao usuário a fim de manter o seu tempo no ar abaixo do delimitado. Visto que o tempo no ar de cada mensagem varia com a taxa de dados de transmissão, cada uma das DRs está associada uma carga útil máxima acessível à aplicação do usuário. A Tabela 3 apresenta a carga útil máxima (MACPayload) e a carga útil máxima de aplicação (FRMPayload) permitidas Para as DRs definidas na Tabela 2.

Tabela 3 – Tamanho máximo da MacPayload e FRMPayload para cada DR na a região LoRaWAN US902-928 MHz

Taxa de Dados (DR)	MACPayload [bytes]	FRMPayload [bytes]
0	19	11
1	61	53
2	133	125
3	250	242
8	61	53
9	137	129
10	250	242
11	250	242
12	250	242
13	250	242

Fonte – Adaptado de (COMITTEE, 2017).

3 Métodos e Materiais

3.1 Implementação do *Gateway*

Gateways são a ponte entre os dispositivos (nós) e o servidor da rede (TTN, 2019). Estes são responsáveis por receber as mensagens da camada física LoRa, demodulá-las e reencaminhá-las ao servidor. Os *gateways* certificados com a rede LoRaWAN (através da LoRa Alliance) são capazes de receber mensagens em 8, 16 ou 64 canais, a depender do hardware utilizado na sua construção. Estes dispositivos baseiam-se nos circuitos integrados (CI) SX1301 e SX1308, que são responsáveis pelo processamento dos sinais na banda base e são capazes de demodular simultaneamente mensagens recebidas com qualquer taxa de dados em até 8 canais (por CI) (SEMTECH, 2017a) (SEMTECH, 2017b). Apesar da atual disponibilidade de inúmeros *gateways* comercialmente, seu custo ainda é alto e há necessidade de importação, o que pode vir a desacelerar o desenvolvimento e tornar projetos de pesquisa de pequeno porte e com pouco orçamento inviáveis.

A fim de criar um enlace de rádio de baixo custo, busca-se a implementação de um *gateway* com um único canal. *Gateways* de canal único, como especificado pelo nome, são dispositivos capazes de receber mensagens LoRa em um único canal e com apenas uma taxa de dados (TTN, 2019). Estes dispositivos fazem uso de transceptores LoRa conectados a *hosts* capazes de suportar uma versão modificada do encaminhador de pacotes desenvolvido pela Semtech (TELKAMP, 2015). Devido a incapacidade de suportar o salto em frequência previsto na especificação da rede LoRaWAN e suas limitações óbvias quanto a taxa de dados, estes dispositivos não são certificados pela LoRa Alliance e seu uso é recomendado apenas para avaliações iniciais da rede e desenvolvimento.

A implementação do *gateway* baseia-se no trabalho desenvolvido por (SECH, 2016) e é composta por um transceptor, um *host* e um encaminhador de pacotes. Os componentes utilizados e suas funções estão descritos abaixo:

Módulo RFM95W: É um módulo de baixa potência baseado no CI SX1276 da Semtech, capaz de transmitir e receber pacotes LoRa (HOPERF, 2017). O RFM95W integra todo o circuito periférico necessário para a operação do transceptor em uma placa de circuito impresso (PCI). Suas especificações de radio frequência e elétrica se encontram na Tabela 4. Ao receber e demodular os frames LoRa, o transceptor adiciona metadados como a potência do sinal recebido (RSSI, do inglês), relação sinal-ruído (SNR, do inglês), fator de espalhamento, largura de banda do sinal e a frequência central do canal, e encaminha estes ao *host* via *Serial Peripheral Interface* (SPI).

Tabela 4 – Especificações elétricas e de rádio frequência do módulo transceptor RFM95W.

Parâmetro	Valor
Tensão de Entrada	3,3 V
Corrente de Recepção	10,3 mA
Frequência de Operação	137 - 1020 MHz
Fator de Espalhamento (SF)	6 a 12
Sensibilidade do Receptor (SF10)	-132dBm
Potência de Entrada (Max.)	10 dBm
Potência de Saída (Max.)	20 dBm

Fonte – Adaptado de (HOPERF, 2017).

Raspberry Pi 3 Modelo B: Utilizado como *host* para o transceptor, o Raspberry Pi 3 Modelo B é um computador de baixo custo desenvolvido pela Raspberry Pi Foundation (FOUNDATION, 2016). Suas especificações encontram-se na Tabela 5. Este dispositivo é responsável por rodar o encaminhador de pacotes, que encaminha as mensagens LoRa recebidas, em conjunto com os metadados adicionados pelo transceptor, ao servidor da rede via Ethernet/Wi-Fi. Portanto, o *host* gerencia o *gateway*, mantendo sempre a conexão com o servidor ativa para encaminhar qualquer pacote recebido. Sua comunicação com o transceptor se dá através do protocolo SPI.

Tabela 5 – Especificações técnicas do Raspberry Pi 3 modelo B.

Parâmetro	Valor
Tensão de Alimentação	5 V
Chip	Broadcom BCM2837
Número de <i>Cores</i>	4
CPU <i>Clock</i>	1 GHz
Memória RAM	1 GB
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Ethernet	10/100 M
Bluetooth	4.1
GPIO	40 pinos
Interfaces Serial	SPI, I2C, UART

Fonte – Adaptado de (FOUNDATION, 2016).

Dual Channel Packet Forwarder: É uma versão encaminhador de pacotes para *gateways* de canal único desenvolvido por (BOKSEM, 2016). O encaminhador de pacotes é um programa que roda no *host* e é responsável pela configuração do transceptor para a recepção de mensagens, formatação dos dados recebidos via SPI e comunicação destes dados ao servidor da rede. Portanto, pode-se dizer que o encaminhador de

pacotes é, em conjunto com o *host*, quem gerencia a rede LoRaWAN no *gateway*. Essa versão foi desenvolvida para *gateways* que possuem até dois transceptores como interface frontal de radio frequência e possui suporte para comunicação bidirecional, no entanto pode ser utilizada com apenas um transceptor.

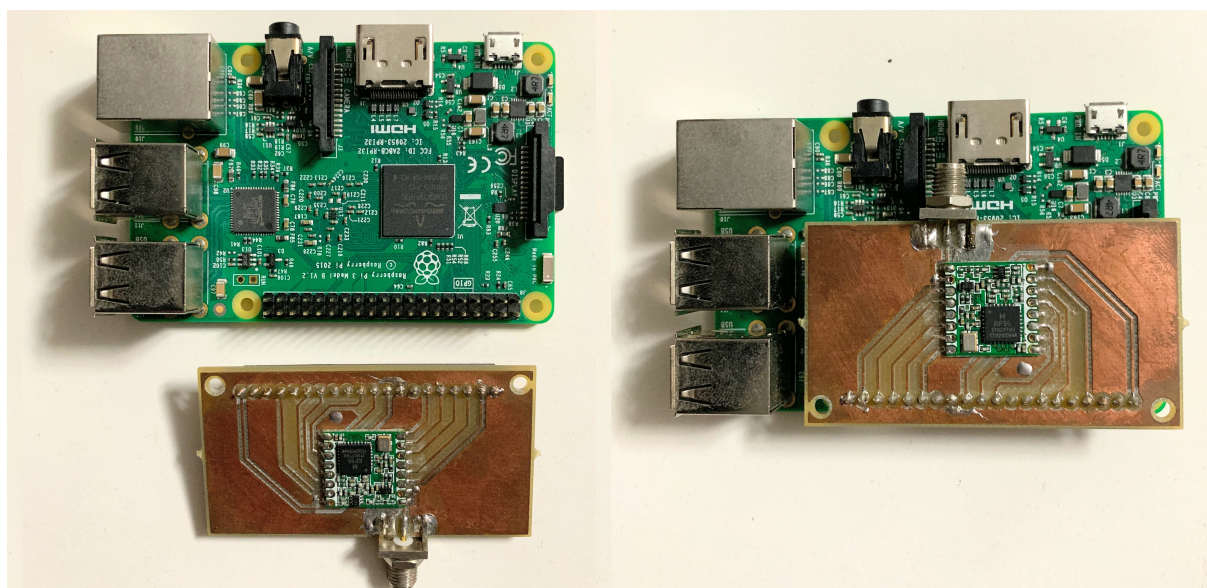
A fim de tornar o *gateway* auto contido e portátil, foi projetada uma PCI de *breakout* do módulo RFM95W. Essa PCI é responsável pelo roteamento das entradas e saídas do módulo RFM95W às respectivas entradas e saídas do *host*. Devido ao fato de que o *host* possui pinos de alimentação externa de 3.3 V capazes de fornecer os níveis de corrente necessários para o funcionamento do módulo transceptor, não foi necessária a adição de uma nova fonte de alimentação na placa. O esquemático e layout da PCI projetada podem ser encontrados no Anexo A. A conexão dos pinos do módulo transceptor e do Raspberry Pi estão descritos na tabela 6. Os pinos de aterramento (GND) não estão representados na Tabela visto que o plano de terra da placa de *break-out* foi integrado com o do Raspberry Pi através dos múltiplos pinos de terra do barramento.

Tabela 6 – Relação de conexões entre o módulo RFM95W e o Raspberry Pi.

RFM95W		Raspberry Pi	
Pino	Função	Pino	Função
2	MISO	19	MOSI
3	MOSI	20	MISO
4	SCK	21	SCK
5	NSS	13	GPIO
6	NRST	11	GPIO
7	DIO5	7	GPIO
11	DIO3	37	GPIO
12	DIO4	35	GPIO
13	3.3 V	1	3.3 V
14	DIO0	33	GPIO
15	DIO1	31	GPIO
16	DIO2	29	GPIO

O encaminhador de pacotes utilizado roda no *host* como um processo, mantendo continuamente aberta a conexão com o servidor. A cada pacote recebido pelo transceptor RFM95W, seus GPIOs mudam de estado, notificando o *host* de que há dados a serem recebidos. O *host* se encarrega da captura dos dados através do protocolo de comunicação SPI, juntando a PHYPayload recebida e os metadados em uma *string* no formato *json*. Esses dados são encaminhados via Wi-Fi ao servidor da rede, quando disponível. Os dados recebidos do transceptor também podem ser acessados em tempo real no *host* através de comandos que dão acesso aos *logs* do processo ativo. A figura 16 apresenta o *gateway* implementado.

Figura 16 – Placa de *breakout* e Raspberry Pi 3 Modelo B à esquerda. *Gateway* Montado à direita

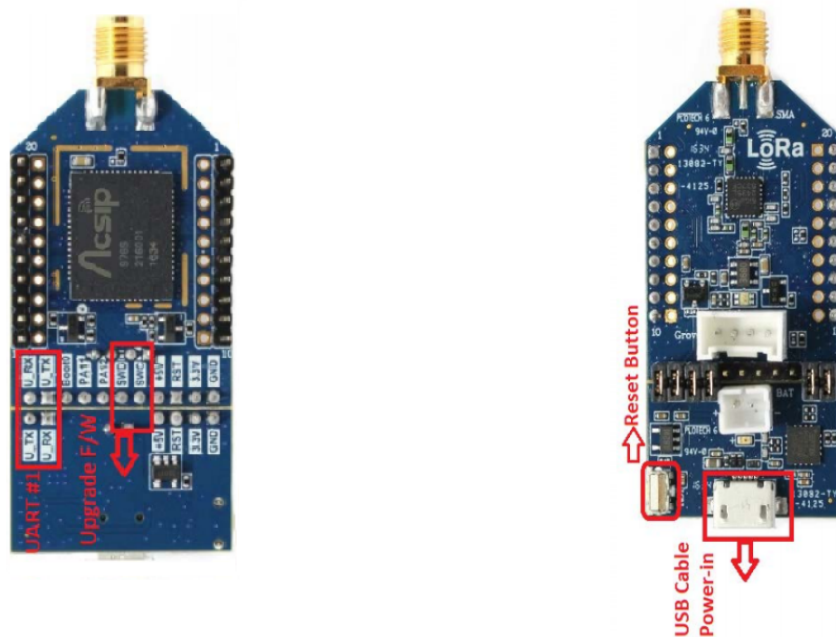


3.2 Implementação do Dispositivo Transmissor (nó)

O dispositivo (nó) utilizado como transceptor LoRa na realização deste trabalho é uma placa de desenvolvimento EK-S76SXB que baseia-se no *system-in-package* (SiP) S76S, da ACSiP, representado na Figura 17. SiPs são definidos como a combinação de dois ou mais circuitos integrados (pastilhas de silício) e, tipicamente, seus demais componentes necessários para a operação do sistema, encapsulados em um único pacote. Dentre as vantagens da utilização de SiPs, destacam-se a agilidade de concepção, visto que os componentes já estão no mercado, a miniaturização do circuito e o aumento da performance com relação a velocidade do fluxo de dados, redução do ruído e consumo de potência, visto que os caminhos entre os CIs (e também entre os demais componentes) são reduzidos drasticamente (APTE et al., 2011).

O SiP ACSiP S76S integra em seu encapsulamento o transceptor SX1276 produzido pela Semtech e o microcontrolador STM32L073RX produzido pela STMicroelectronics. Além disso, encontram-se encapsulados ainda os componentes passivos necessários para cada CI, incluindo capacitores de desacoplamento e *bypass*, três cristais osciladores e a interface frontal de rádio frequência para o transceptor (rede de casamento de impedância e chave de transmissão e recepção) (ACSIP, 2016). O S76S é fornecido em um encapsulamento de montagem superficial (SMT) com 60 pinos e dois planos de terra. O diagrama de blocos do S76S exemplifica sua configuração e encontra-se na Figura 18. As principais características elétricas e de rádio frequência do SiP encontram-se na Tabela 7.

Figura 17 – Placa de desenvolvimento EK-S76SXB.

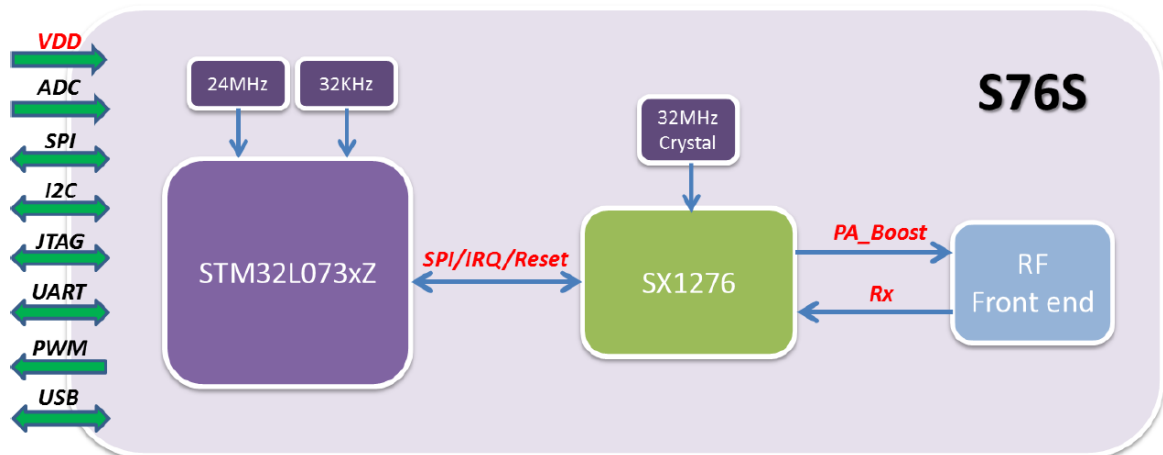


(a) Lado inferior, mostrando a localização do SiP.

(b) Lado posterior.

Fonte – (ACSIP, 2016).

Figura 18 – Diagrama de blocos do SiP S76S.



Fonte – (ACSIP, 2016).

O *firmware* a ser desenvolvido para o dispositivo baseia-se na implementação de referência versão 4.4.1 da camada MAC LoRaWAN, denominada *LoRaMac-Node*, desenvolvida e mantida pela Semtech (SEMTECH; STACKFORCE, 2018b). A interface de programação (API, do inglês) fornecida baseia-se em três tipos de serviços, com uma arquitetura que segue um conceito de *Request-Confirm* e *Indication-Response*. Os serviços são a *MAC common part sublayer* (MCPS), a *MAC layer management entity* (MLME)

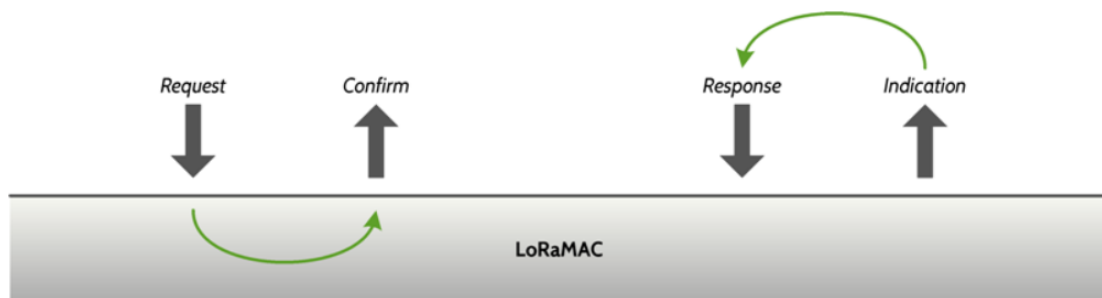
Tabela 7 – Especificações técnicas do ACSiP S76S.

Parâmetro	Valor
Tensão de Alimentação	2.0 - 3.6 V
Corrente de <i>Standby</i>	9 mA
Corrente de <i>Sleep</i>	1.7 μ A
Corrente de Recepção	17.5 mA
Corrente de Transmissão (20dBm)	127 mA
Fator de Espalhamento	6 - 12
Sensibilidade do Receptor	-109 a -137 dBm
Potência Máxima de Saída	21 dBm
Interfaces Serial	SPI, I2C, UART
Interface de Programação	SWD

Fonte – Adaptado de (ACSIP, 2016).

e *Mac information base*. Os serviços MCPS são utilizados na transmissão e recepção de mensagens, a MLME oferece serviços de gerenciamento da rede LoRaWAN e a MIB é responsável por informações operacionais e serve como uma base de dados das configurações do dispositivo. Com base nessa arquitetura, a camada de aplicação do dispositivo é, então, capaz de comunicar-se com a camada MAC através de *Requests*, que são respondidos com primitivos de *Confirm*. Similarmente, a camada MAC notifica a aplicação com primitivos *Indication* no caso de eventos, e permite que a aplicação responda com primitivos *Response* (SEMTECH; STACKFORCE, 2018a). A Figura 19 exemplifica as transações entre a camada de aplicação e MAC.

Figura 19 – Diagrama de transações entre a camada MAC e de aplicação na implementação de referência de um dispositivo que opera na rede LoRaWAN.



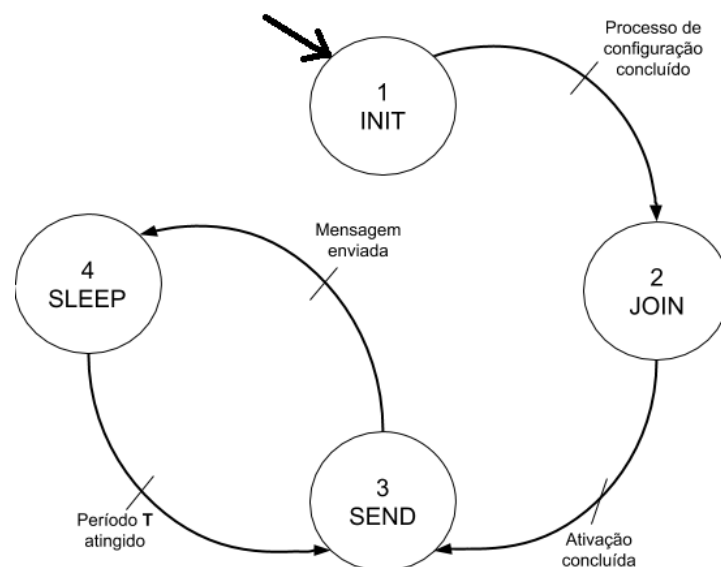
Fonte – (SEMTECH; STACKFORCE, 2018a).

Apesar do LoRaMAC-Node possuir suporte para diversas plataformas de desenvolvimento (microcontroladores e transceptores), o S76S não é uma delas. Além disso, o projeto visa a generalidade e, por isso, não está ligado a nenhum ambiente integral de

programação (IDE, do inglês). Para o desenvolvimento de uma aplicação capaz de enviar mensagens LoRa é, então, necessária a adaptação do projeto de referência. Seguindo os passos descritos em (SEMTECH; STACKFORCE, 2018a), a implementação de referência da camada MAC da rede LoRaWAN é adaptada para conter as bibliotecas de abstração de hardware fornecidas pela ACSiP. A fim de facilitar o desenvolvimento, o projeto é migrado para a *System Workbench for STM32*, uma IDE gratuita desenvolvida pela AC6 Tools e fornecida pela STMicroelectronics.

Tendo em vista que o único requisito da aplicação a ser desenvolvida é o envio de mensagens periodicamente para validação do enlace de rádio, captura e visualização das formas de onda da camada física e análise de coexistência, busca-se a criação de um dispositivo LoRa de classe A. Tendo novamente como base a aplicação de referência fornecida por (SEMTECH; STACKFORCE, 2018b), é criada uma máquina de estados na qual o dispositivo passa por um processo de inicialização da camada MAC e segue enviando mensagens periodicamente (com período pré-especificado) com uma taxa de dados fixa e em um único canal. Os parâmetros regionais da rede LoRaWAN impedem que o dispositivo envie mensagens em apenas um canal e, portanto, é necessário ainda modificar a camada MAC para que esta aceite um banco de canais contendo apenas um canal ativo. Essa modificação, no entanto, não afeta nenhuma condição de operação da rede. A Figura 20 ilustra a máquina de estados implementada. Finalmente, a programação do dispositivo é feita utilizando o ST-Link V2, um programador desenvolvido pela STMicroelectronics para sua linha de microcontroladores.

Figura 20 – Máquina de estados implementada no dispositivo transmissor. T representa um período customizável de acordo com o teste a ser realizado.



A descrição de cada um dos estados da máquina de estados encontra-se abaixo:

Estado 1 (INIT): É o estado de inicialização da camada MAC da rede LoRaWAN. Nele são inicializados os primitivos do LoRaMAC-Node, assim como configurações do dispositivo. Nesse estado, através da MIB, é desligada a taxa de dados adaptativa, configurada a rede LoRaWAN como pública, o canal a ser utilizado para transmissão (mapa de canais) e a potência de saída do dispositivo.

Estado 2 (JOIN): É o estado de ativação do dispositivo na rede. Nesse estado é utilizado o método de ativação ABP e, portanto, os parâmetros de ativação do dispositivo na rede (DevAddr, NwkSKey e AppSKey) são passados para a camada MAC através da MIB.

Estado 3 (SEND): É o estado responsável pelo envio de mensagens *uplink*. Nele é definida a porta na qual o *frame* será enviado e o mesmo é preparado com os dados de camada de aplicação. O processo de envio dessa mensagem é realizado através da MCPS.

Estado 4 (SLEEP): É o estado de menor consumo de energia do dispositivo. Nesse estado é esperado pela abertura e fechamento das janelas de recepção e, em seguida, o dispositivo é colocado em seu estado de menor consumo energético. Nesse estado apenas um *clock* de tempo real e uma interrupção via GPIO estão ativados, sendo estes os únicos meios de acordar o dispositivo.

3.3 Validação do Enlace de Rádio

A validação do enlace de rádio deve se dar em duas etapas, a primeira sendo *offline* e a segunda *online* com o encaminhador de pacotes apontando para um servidor real da rede LoRaWAN. Na primeira etapa, faz-se uso das atualizações de *status* fornecidas pelo serviço do encaminhador de pacotes que roda no Raspberry Pi. Para tal, é necessário configurar ambos o dispositivo transmissor e o *gateway* para o mesmo canal e fator de espalhamento. Utilizando um conjunto de chaves ABP qualquer (DevAddr, NwkSKey e AppSKey) programados no dispositivo transmissor, devem ser iniciadas as transmissões periódicas. A cada pacote enviado o *gateway* deve fornecer uma atualização de *status* informando os metadados da mensagem e contendo a mensagem criptografada. Dado o recebimento da atualização é possível concluir que o *gateway* está recebendo as mensagens.

Apesar de o recebimento do pacote pelo *gateway* ser um indicador de que este é capaz de receber pacotes da rede LoRaWAN, é necessário ainda que os parâmetros da PHYPayload sejam validados. Para realização do processo de verificação dos dados é necessário que a carga útil (PHYPayload) seja decriptada, primeiramente, com a chave

NwkSKey. A partir desse procedimento é possível validar as informações pertencentes a camada MAC. Para a validação da carga útil de aplicação (FRMPayload) é necessário ainda que esta seja decriptada com a AppSKey. O processo de decriptação da mensagem é realizado através da plataforma *online LoRaWAN Packet Decoder*, que toma como entrada a PHYPayload e as chaves de encriptação (NwkSKey e AppSKey) e retorna os elementos do pacote devidamente classificados (KIRBY, 2019).

Para a segunda etapa é necessário que ambos o dispositivo transmissor e o *gateway* estejam devidamente registrados em um servidor da rede LoRaWAN. O servidor escolhido foi o da rede *The Things Network*, uma rede LoRaWAN global, aberta e gratuita que fornece recursos e ferramentas para os usuários construírem suas aplicações (TTN, 2019). Seguindo os passos descritos em (TTN, 2019), os processos envolvidos na validação online do enlace estão descritos abaixo:

Registro do Gateway: O registro do *gateway* na rede The Things Network é um processo simples. Para tal, é necessário informar o identificador único do gateway, que é fornecido ao rodar o encaminhador de pacotes no *host*, o plano de frequências utilizado e o roteador de pacotes. O plano de frequências utilizado no Brasil é o US902-928 MHz e o roteador deve ser escolhido com base na região geográfica onde o *gateway* se encontra. Neste caso, escolheu-se o roteador *ttn-router-brazil*.

Configuração do Encaminhado de Pacotes: Para que o *gateway* seja capaz de encaminhar as mensagens devidamente para a rede, é necessário que este esteja saiba o endereço do servidor. Neste caso, o servidor utilizado foi o *router.us.thethings.network* conforme instruído em (TTN, 2019). Após o registro do *gateway* e configuração do encaminhador de pacotes é possível verificar sua conectividade.

Registro do Dispositivo: A fim de reduzir a complexidade da validação, o método de ativação escolhido para ativação do dispositivo na rede é o ABP. No processo de registro do dispositivo, é necessário que haja um identificador único (DevEUI). Esse valor deve ser informado ou gerados pela própria The Things Network. Ao escolher o método de ativação ABP no processo de registro, o console da rede informa ao usuário todos os parâmetros únicos do dispositivo que devem ser personalizados para que este seja devidamente identificado no servidor (DevAddr, NwkSKey, AppSKey).

Configuração do Dispositivo: Para que as mensagens sejam devidamente roteadas e decriptadas pelo servidor da rede, o dispositivo deve ser personalizado com o DevAddr, a NwkSKey e AppSKey fornecidos pela The Things Network. Para tal, o LoRaMAC-Node possui um arquivo de cabeçalho de referência, denominado de *commissioning*, responsável pela definição destes parâmetros. Após a inserção dos devidos parâmetros e programação do dispositivo este deve estar pronto para se comunicar via LoRaWAN.

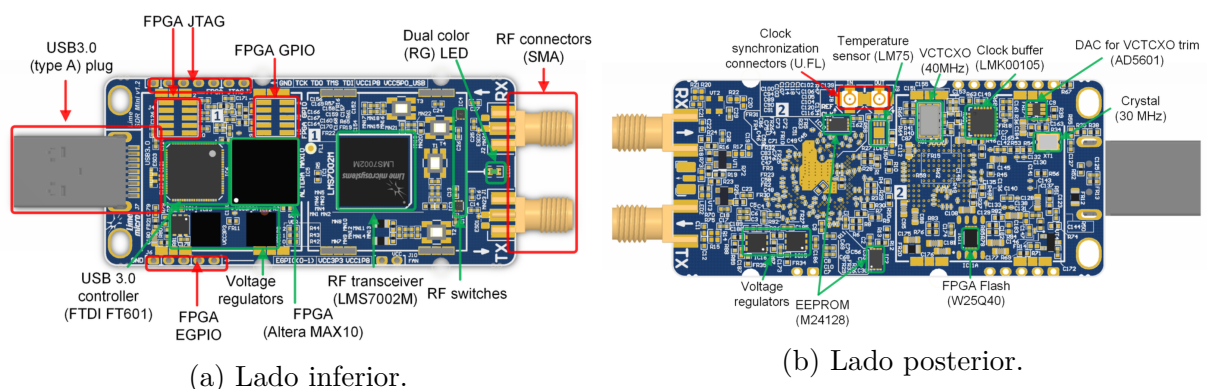
Finalmente, após o registro e configuração de ambos o *gateway* e o dispositivo transmissor, o enlace de rádio se encontra completo. Portanto, as mensagens enviadas pelo dispositivo transmissor devem ser recebidas e mostradas no console *online* da rede The Things Network. Desse modo, é possível avaliar a funcionalidade do encaminhador de pacotes. A nível de camada física, este segundo método de validação permite ainda que pacotes com erros sejam detectados.

3.4 Aquisição da Forma de Onda LoRa

Como mencionado na Seção 2.2, a modulação LoRa é proprietária e, apesar de haver documentação oficial, os detalhes da modulação não são divulgados pela Semtech. Desse modo, a fim de visualizar o funcionamento da modulação LoRa e validar os parâmetros do sinal do sinal transmitido, busca-se capturar formas de onda distintas através da utilização de diferentes configurações de fator de espalhamento.

Para a captura das formas de onda utiliza-se o LimeSDR Mini, um SDR de baixo custo desenvolvido pela Myriad RF. SDRs são sistemas de comunicação via rádio onde, segundo (INTERNATIONAL COMMUNICATION UNION, 2009), são utilizadas tecnologias que permitem que parâmetros de RF sejam modificados via software. Estes parâmetros incluem (mas não estão limitados a) frequência de operação, tipo de modulação e/ou potência de saída. Pode-se dizer ainda que, nestes rádios, tarefas de processamento de sinais que são tipicamente realizadas via hardware podem ser implementadas em software. A Figura 21 apresenta o SDR utilizado e a Tabela 8 apresenta suas características.

Figura 21 – *Software Defined Radio* LimeSDR Mini.



Fonte – (MYRIADRF, 2019).

O conjunto de ferramentas a serem utilizadas na aquisição e processamento das amostras da forma de onda LoRa são:

GNU Radio: É um conjunto de ferramentas gratuito e de software livre que fornece blocos de processamento de sinal para implementação de rádios em software. Através

Tabela 8 – Especificações técnicas do LimeSDR-Mini v1.2.

Parâmetro	Valor
Controlador USB 3.0	FTDI FT601
FPGA	Intel Max 10
Transceptor RF	LMS7002M
Oscilador	RTX5032A @ 40 MHz
Frequência de Operação	10 - 3500 MHz
Potência Máxima de Saída	10 dBm
Potência Máxima de Entrada	12 dBm

Fonte – Adaptado de (MYRIADRF, 2019).

da sua interface gráfica, *gnuradio-companion*, ou via *scripts* é possível utilizar essas ferramentas tanto para simulações, quanto com uma série de SDRs disponíveis no mercado para a criação de rádios definidos por software (RADIO, 2019). No contexto desse projeto, o GNU Radio é utilizado na configuração do SDR como um receptor e na gravação das amostras do sinal.

Inspectrum: É um analisador de espectro *offline* que permite a visualização e análise de sinais capturados, primeiramente, com SDRs (WALTERS, 2016). Tomando como entrada amostras IQ de um sinal previamente capturado, o Inspectrum fornece um espectrograma e permite que sejam determinadas diversas propriedades do sinal de maneira simples e gráfica.

Baudline: É uma ferramenta gratuita desenvolvida para a visualização científica do domínio espectral (BAUDLINE, 2010). É um analisador de sinais que pode ser integrado com a saída do SDR para visualização do espectro de maneira contínua, ou então utilizado de maneira *offline*. Dentre suas principais características, destacam-se a presença de um analisador de espectro, capacidade de pesquisa temporal e frequencial em espectrograma e a presença de um osciloscópio digital.

O SDR é utilizado como uma forma de analisador espectral. Para que o dispositivo seja assim utilizado, é criado um diagrama de blocos no software GNU Radio, cuja função é definir o SDR como um receptor. Assim, as ondas eletromagnéticas recebidas são convertidas para a banda base e amostradas por um conversor analógico digital. Cada amostra recebida contém uma componente em fase (I) e uma componente em quadratura (Q). Essas amostras, denominadas amostras IQ, são então armazenadas em um arquivo para que possam ser analisadas posteriormente.

A análise das amostras IQ se dá através dos softwares Baudline e Inspectrum. O primeiro é utilizado para verificação inicial de que o sinal capturado está devidamente

visível e de acordo com o esperado. Nele são projetados o espectro de frequência e o espectrograma de maneira estática. O segundo software também projeta o espectrograma do sinal de maneira estática. No entanto, este é equipado com uma interface gráfica que, através de cursores, permite com que sejam medidas características do sinal como o tempo no ar, período do símbolo e a taxa de símbolos. Portanto, o Inspectrum é utilizado como uma ferramenta para isolar o período de interesse do sinal, recortá-lo e fazer a análise dos parâmetros do sinal.

3.5 Análise de Comunicação Sob Coexistência

A análise de comunicação sob coexistência tem por objetivo avaliar a robustez da camada física da rede LoRaWAN contra interferências. De modo a realizar a análise, é projetado um experimento no qual um sinal modulado LoRa é transmitido em um canal que possui um interferente cuja potência irradiada é variável. Tendo em vista que os materiais disponíveis para a geração do sinal LoRa e do interferente possuem potência de saída limitadas, opta-se pela realização do experimento em um ambiente confinado. Neste ambiente, os sinais gerados pelo nó transmissor LoRa e o interferente se propagam através de um cabo coaxial. Desse modo é possível controlar de maneira precisa a potência irradiada dos sinais e livrar-se de outras possíveis interferências presentes no ambiente de realização do experimento.

Segundo (RAPPAPORT, 2002) modulações que fazem uso de técnicas de espectro espalhado possuem habilidades inerentes de resistência a interferentes de banda estreita. Tendo em vista que a LoRa é uma modulação que faz o uso de tais técnicas, opta-se pela geração de um interferente de banda larga na realização do experimento. Utilizando o software GNU Radio gera-se na saída do LimeSDR Mini um sinal modulado com *differential phase shift keying* (DQPSK) cuja transmissão é ininterrupta. Os parâmetros do sinal são escolhidos de tal modo que a largura de banda ocupada seja maior do que a largura de banda do sinal LoRa. A frequência da portadora utilizada é a mesma que a do sinal LoRa, garantindo que a frequência central da banda do sinal LoRa seja a mesma que a do interferente.

A potência de saída da interferência é controlada utilizando uma combinação de atenuadores variáveis. O atenuador 8496B, fabricado pela Keysight, possui atenuação máxima de 110 dB em passos de 10 dB e é ligado em série com o 8494B cuja atenuação máxima é de 11 dB em passos de 1 dB. Quando conectados em série fornecem uma faixa dinâmica de 121 dB e uma resolução de 1 dB. Os atenuadores ligados em série encontram-se na Figura 22.

O sinal LoRa é gerado independentemente com o kit de desenvolvimento EK-S76SXB e com a implementação descrita na Seção 3.2. Desse modo, são enviados pacotes

Figura 22 – Atenuadores 8496B e 8494B ligados em série por uma ponte coaxial.



LoRa a cada 5 segundos utilizando a potência máxima do transmissor. Um atenuador fixo de 40 dB é conectado à saída de radio frequência do transmissor LoRa a fim de evitar que o amplificador de baixo ruído (LNA) na entrada do receptor saturar. Além disso, a presença deste atenuador permite com que a interferência atinja níveis de potência maiores do que a do sinal LoRa, que é uma condição necessária para a realização do experimento previsto. O receptor dos sinais utilizado é o *gateway* implementado, cuja descrição se encontra na Seção 3.1. Este dispositivo é responsável pela demodulação dos pacotes recebidos, captação dos metadados e encaminhamento das mensagens ao servidor da rede para que estas sejam validadas.

A combinação do sinal LoRa e da interferência é feita através do combinador/divisor de sinais Wilkinson J2065. Utilizado como combinador na configuração do experimento, este dispositivo atua na faixa de 700 MHz a 2,7 GHz, possui uma impedância de 50 Ohms, duas portas de entrada e uma porta de saída. O sinal interferente é conectado a uma das portas de entrada através do atenuador variável, enquanto que o sinal LoRa é ligado à outra através do atenuador fixo. Sua saída é conectada diretamente à entrada do *gateway*. A Figura 23 apresenta o combinador de sinais utilizado.

A fim de avaliar o valor de potência de saída dos sinais combinados realiza-se um procedimento de calibração do sistema. São medidas as potências de saída de cada um dos sinais avaliados individualmente e, em seguida, de todo o sistema. Para realizar as medições é utilizada a ponteira de medição de potência U2001A da Agilent Technologies. A ponteira tem uma faixa dinâmica de 80 dB, sendo capaz de ler potências de -60 dBm a +20 dBm. O instrumento é ligado ao analisador de espectro N9912A da Agilent Technologies via USB, onde é possível verificar os valores lidos através de uma interface gráfica. A ponteira utilizada e sua configuração com o analisador de espectro é mostrada na Figura 24.

Figura 23 – Combinador/divisor de sinais Wilkinson J2065.



A realização do experimento consiste na variação da potência de saída do interferente em passos definidos para duas configurações diferentes do sinal LoRa, buscando encontrar o valor mínimo da relação sinal-ruído (SNR) na qual o receptor se torna incapaz de demodular corretamente os pacotes. A métrica de avaliação da incapacidade de demodulação de pacotes no receptor se dá através da taxa de erro de pacote (PER). São considerados pacotes com erro todos aqueles que são automaticamente descartados pelo receptor devido à invalidez da CRC do cabeçalho do pacote (PHDR_CRC) e todos àqueles que não tem sua validade autenticada pelo servidor da rede. A utilização do servidor da rede para a validação de pacotes se deve ao fato de que a implementação atual do *gateway* não possui suporte para a validação da CRC do pacote localmente, tornando possível o recebimento de pacotes com CRC inválido (ou seja, com erros) ao *host*. Desse modo, o servidor da rede atua como uma ferramenta capaz de verificar a autenticidade dos pacotes automaticamente, detectando qualquer erro que os pacotes possam apresentar. Os pacotes devidamente autenticados pelo servidor da rede são encaminhados juntos com seus respectivos metadados à um computador através do protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) via Wi-Fi.

Para cada valor de potência configurado no atenuador variável, são enviados um total de 1000 pacotes LoRa. Para cada pacote válido recebido do servidor da rede via MQTT são monitorados o valor do contador de mensagem, SNR e RSSI calculados no *gateway*. Ao final de cada sequência de 1000 pacotes são calculados o valor médio da SNR

Figura 24 – Ponteira para medição de potência U2001A e analisador de espectro N9912A.



(a) Ponteira de potência U2001A.

(b) Analisador de espectro N9912A.

e da RSSI, assim como o total de pacotes válidos recebidos. O experimento é realizado, inicialmente, para uma modulação LoRa com largura de banda de 125 kHz, SF = 10 (DR0) e taxa de código da correção de erros em avanço CR = 4/5. O mesmo procedimento é repetido para uma modulação LoRa com largura de banda de 125kHz, SF = 7 e CR = 4/5. São utilizadas essas duas configurações visto que elas representam a menor taxa de dados (DR0) e a maior (DR3) para dispositivos LoRaWAN operando na região US915. A validação dos resultados obtidos é dada através dos dados fornecidos na folha de especificações do receptor utilizado no gateway (HOPERF, 2017). A taxa de erro de pacotes é calculada de acordo com a Equação 3.1 abaixo.

$$PER = \frac{Pacotes\ Enviados - Pacotes\ Válidos}{Pacotes\ Enviados} \cdot 100 \quad (3.1)$$

4 Experimentos e Resultados

4.1 Validação do Enlace de Rádio

A fim de verificar as implementações do nó transmissor e do *gateway* (Seções 3.2 e 3.1, respectivamente) e validar o enlace de rádio criado, são realizados dois experimentos. O experimento inicial consiste na validação do enlace de rádio de maneira *offline*, visando garantir que o dispositivo implementado é capaz de transmitir mensagens no formato da rede LoRaWAN e, ainda, que o *gateway* implementado é capaz de receber, demodular e enviar a carga útil e os metadados da mensagem ao *host*. O segundo experimento repete o cenário do primeiro, porém tem por objetivo a validação do enlace de rádio utilizando a rede LoRaWAN pública *The Things Network*.

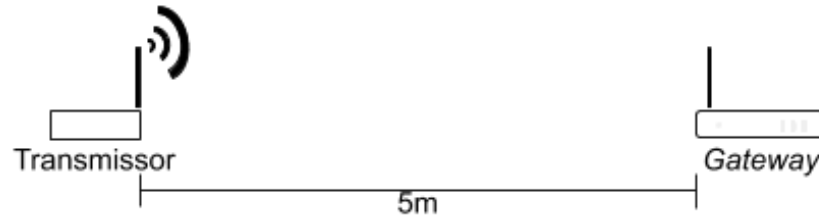
Para a realização destes experimento o dispositivo é programado para enviar mensagens em um único canal a cada 5 segundos. O *gateway* e o dispositivo são separados de aproximadamente 5 metros para evitar a saturação do sinal na entrada do receptor. Para ambos os cenários (*online* e *offline*) realizados são escolhidos um fator de espalhamento 10 (SF10) e uma largura de banda de 125 kHz para a modulação LoRa e, portanto, os dados são transmitidos com a taxa de dados DR0. O *gateway* é configurado para receber uma onda modulada com os mesmos parâmetros de transmissão do dispositivo. O diagrama do experimento está apresentado na Figura 25. Um resumo dos parâmetros do dispositivo encontra-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo dos parâmetros de transmissão do dispositivo para o experimento.

Parâmetro	Valor
Modulação	LoRa
Fator de Espalhamento	10
Largura de Banda	125 kHz
Taxa de Dados Nominal	980 bps
Canal	0
Frequência da Portadora	902,3 MHz
Potência de Saída	20 dBm
Tamanho da Carga Útil de Aplicação	11 bytes
Carga Útil de Aplicação	000102030405060708090A
FPort	02
Taxa Cíclica de Transmissão	5 s

Para ambos experimentos é necessário, ainda, que o dispositivo seja programado com os parâmetros de ativação ABP. No primeiro experimento, esses parâmetros são

Figura 25 – Configuração do experimento realizado para validação do enlace.



utilizados para validar que os pacotes enviados foram recebidos de maneira correta. Para o segundo, tais parâmetros são utilizados para registrar o dispositivo na rede *The Things Network* e necessários para que o dispositivo seja devidamente identificado e as mensagens sejam encaminhadas para o servidor de aplicação. A Tabela 10 apresenta os parâmetros ABP utilizados no experimento.

Tabela 10 – Resumo dos parâmetros de ativação ABP do dispositivo transmissor.

Parâmetro	Valor
<i>Device EUI</i>	00D62138124DD743
<i>Device Address</i>	260216C3
<i>Network Session Key</i>	7CF52DF1C13A5B9136515EAB5B1A5A8B
<i>Application Session Key</i>	28EB0743267184403F81F083E0CD70ED

O resultado do primeiro experimento é dado na Figura 26. Nesta figura é mostrado o pacote LoRaWAN recebido pelo *gateway* e decodificado, em conjunto com os metadados da mensagem. A presença desta mensagem de *status* do *gateway* demonstra que este foi capaz de receber e demodular o pacote. Para que seja confirmada a recepção correta da mensagem, devem ser avaliados os metadados desta e, subsequentemente, a carga útil deve ser validada. A mensagem que deve ser encaminhada para o servidor da rede é apresentada no formato *json* e tem seu início no primeiro colchete apresentado. Observa-se então que os metadados da mensagem recebida e seus valores são:

Figura 26 – Mensagem publicada pelo *gateway* ao receber uma mensagem do nó transmissor.

```
CE0 Packet RSSI: -36, RSSI: -49, SNR: 9, Length: 24 Message:rxpk update: [{"rxpk":[{"tmst":
957247638,"freq":902.3,"chan":0,"rfch":0,"stat":1,"modu":"LORA","datr":"SF10BW125","codr":
"4/5","rssi":-36,"lsnr":9.0,"size":24,"data":"QMMWaiYA6AMC30mT1pVB7Slq003pwLZr"}]}
```

"*tmst*" é a estampa de tempo interna do momento em que o processo de recepção da mensagem foi terminado.

"*freq*" é o valor da frequência central do canal, dado em MHz. Neste caso, o valor observado é de 902.3 MHz.

"*chan*" é o índice do canal no qual a mensagem foi recebida. O valor mostrado é 0, o que está coerente visto que o canal cuja frequência central é de 902.3 MHz é o primeiro canal da região LoRaWAN US915MHz.

"*rfch*" é o índice da cadeia receptora do concentrador na qual o pacote foi recebido e demodulado. Neste caso, como o receptor é capaz de operar em apenas um canal, observa-se que o valor é 0.

"*stat*" é o estado do CRC do pacote. O valor observado neste campo é 1, o que indica que o valor do *check* do pacote da camada física está de acordo com o esperado. Um valor de -1 neste campo indica que o *check* não está de acordo com o enviado. Um valor nulo indica a ausência deste parâmetro. Na implementação do *gateway* utilizada este valor é fixado em 1, visto que o registrador que reporta a validade da CRC do pacote não é verificado antes de repassar a mensagem ao servidor.

"*modu*" indica a modulação utilizada no pacote recebido. Neste caso a modulação é LoRa, o que está de acordo com o valor apresentado na figura.

"*datr*" é um indicador da taxa de dados utilizada. Neste caso, o valor *SF10BW125* indica que a mensagem foi transmitida com um fator de espalhamento 10 em uma largura de banda de 125kHz. Esse valor classifica a taxa de dados DR0.

"*codr*" mostra a taxa de código utilizada na mensagem. Neste caso é utilizado o padrão da rede LoRaWAN, que é 4/5.

"*rssr*" é o indicador da potência do sinal recebido pelo receptor dada em dBm. Neste caso, observa-se um valor de -85 dBm.

"*lsnr*" indica o valor da SNR de sinais recebidos com a modulação LoRa. O valor da SNR para este pacote é de 12 dB, um valor considerado alto.

"*size*" representa o tamanho da *PHYPayload*, em bytes. Nota-se que este valor é maior do que o da carga útil de aplicação enviada. Isso se deve ao fato de que a *PHYPayload* é composta por informações da camada MAC, além dos dados da camada de aplicação. A composição da *PHYPayload* é demonstrada pela Figura 7, na Seção 2.3.

"*data*" é a *PHYPayload* da mensagem, apresentada em base 64 e encriptada pela *NwkS-Key*.

A partir da descrição acima é possível validar os parâmetros da taxa de dados (SF e largura de banda), tipo de modulação, canal e frequência central do canal utilizados na mensagem transmitida. Utilizando um decriptador de mensagens LoRa *online* (KIRBY, 2019) é possível decodificar a PHYPayload da mensagem e extrair os dados da camada MAC e de aplicação. É importante notar que a implementação do *gateway* utilizada possui o campo "stat" com valor fixo 1, visto que os registradores que indicam a validade do CRC não são verificados antes de passar a mensagem para o servidor da rede. Desse modo, a validade do pacote é confirmada apenas pelo valor do código de integridade de mensagem (MIC). Tendo em vista que o experimento é realizado em um ambiente considerado livre de interferências e o valor da SNR do pacote é alto, utilizando a *NwkSKey* obtém-se uma PHYPayload que pode ser considerada confiável. A Tabela 11 apresenta o valor da PHYPayload em hexadecimal e os respectivos campos referentes aos dados da camada MAC que podem ser extraídos. É importante notar que a FRMPayload, i.e., a carga útil de aplicação, é encriptada pela AppSKey.

Tabela 11 – Campos da *PHYPayload* decriptados.

Campo	Subcampo	Valor
PHYPayload	MHDR	40
	MACPayload	C316022600000002E17D822DB5031963C90BF8
	MIC	799C8060
MACPayload	FHDR	C3160226000000
	FPort	02
	FRMPayload	E17D822DB5031963C90BF8
FHDR	DevAddr	260216C3
	FCtrl	00
	FCnt	0000
	FOpts	Nulo/ausente
FCtrl	ADR	Falso
	ACK	Falso

Observa-se então, a partir da Tabela 11, que todos os valores da MACPayload (exceto FRMPayload, que ainda precisa ser decriptado), FHDR e FCtrl estão de acordo com os parâmetros da mensagem enviada que são apresentados na tabela 9. Decriptando a MACPayload com a AppSKey, obtém-se então o valor "000102030405060708090A", que está de acordo com o enviado. A ferramenta utilizada para a decriptação do pacote com a AppSKey é capaz de confirmar ainda a validade do MIC. Portanto, é possível afirmar que o enlace de rádio LoRaWAN criado está de acordo com o esperado.

Para a segunda etapa da validação é então registrado o dispositivo na rede *The Things Network* e o procedimento de envio de pacotes é repetido. Observa-se na interface

gráfica o recebimento do pacote na aba que indica o tráfego de pacotes no *gateway*. Essa aba atua como uma visualização gráfica do servidor da rede, visto que o pacote que chega é devidamente decriptado com a *NwkSKey* e as informações da *PHYPayload* são dispostas no formato *json*. Essas informações estão dispostas na Figura 27. Nota-se que o *DevAddr* do dispositivo está de acordo com o programado, assim como os parâmetros de modulação, taxa de dados, frequência, taxa de código e tamanho da carga útil.

Figura 27 – Mensagem publicada pelo servidor da rede ao receber os dados a *PHYPayload* e os metadados encaminhados pelo encaminhador de pacotes do *gateway*.

The screenshot displays the 'GATEWAY TRAFFIC' interface for a specific gateway. It shows a table of traffic events with columns for time, frequency, modulation, coding rate, data rate, airtime, and count. A red box highlights a specific event at 16:14:27 with a frequency of 902.3, modulation of lora, coding rate of 4/5, data rate of SF 10 BW 125, airtime of 370.7 ms, and a count of 0. The event details are expanded to show the Dev Address (26 02 16 C3), Network (The Things Network), Net ID (0x13), Region (World), and Physical Payload (40 C3 16 02 26 00 00 00 02 E1 7D 82 2D B5 03 19 63 C9 0B F8 79 9C 80 60). A red box also highlights the Event Data section, which contains a JSON object with the following fields:

```

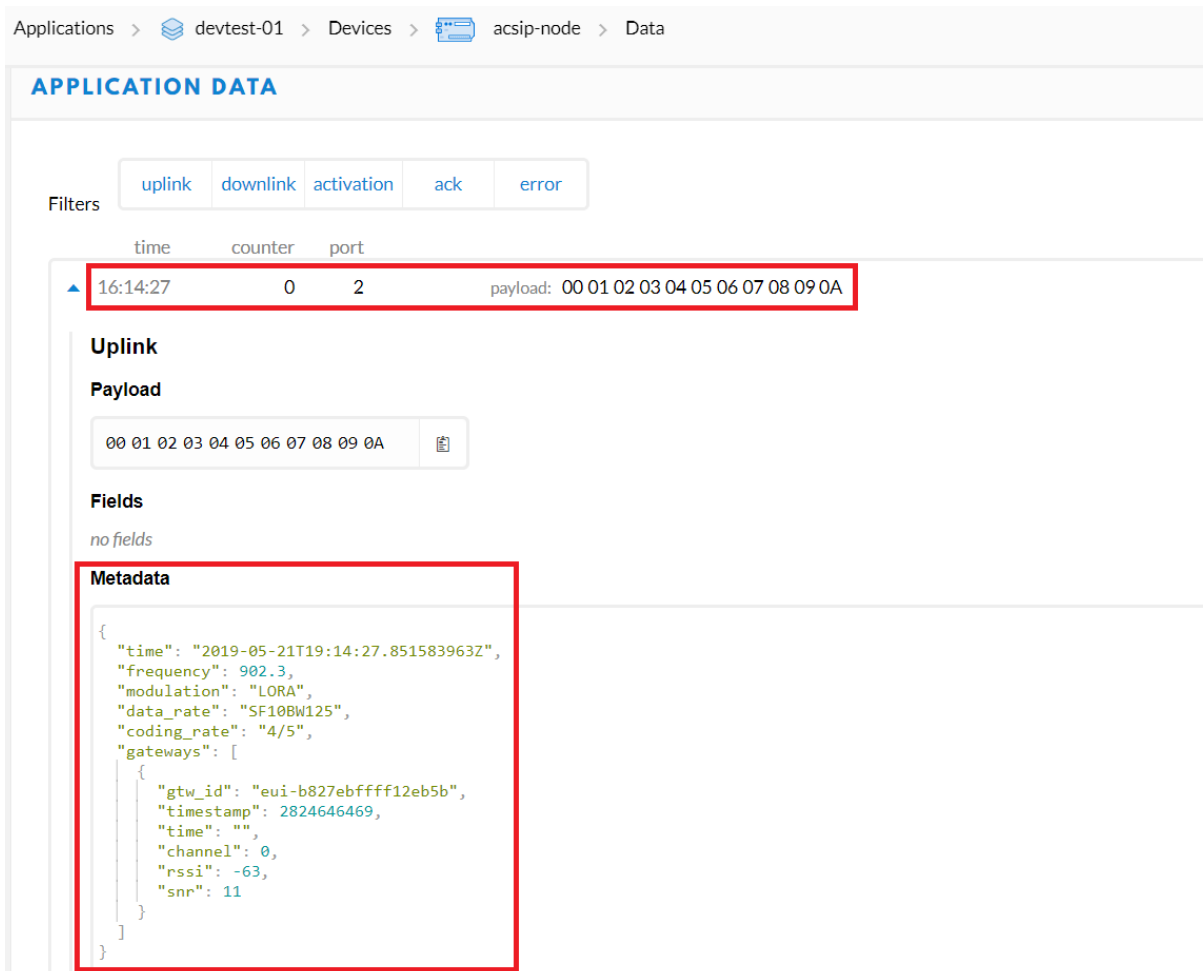
2  "gw_id": "eui-b827ebffff12eb5b",
3  "payload": "QMMWAiYAAAC4X2CLbUDGWPJC/h5nIBg",
4  "lora": {
5    "spreading_factor": 10,
6    "bandwidth": 125,
7    "air_time": 370688000
8  },
9  "coding_rate": "4/5",
10 "timestamp": "2019-05-21T19:14:27.921Z",
11 "rssi": -63,
12 "snr": 11,
13 "dev_addr": "260216C3",
14 "frequency": 902300000

```

Observando a aba do dispositivo no console online da rede *The Things Network* é possível então ver que a mensagem é devidamente encaminhada para a camada de aplicação. A Figura 28 apresenta a mensagem recebida no console do dispositivo. O aparecimento da mensagem na aba do dispositivo confirma que a CRC passou e que o MIC está de acordo com o esperado. A carga útil de aplicação (*FRMPayload*) é decriptada utilizando a

AppSKey e apresentada ao usuário. Além disso, os metadados da mensagem são fornecidos no formato *json*.

Figura 28 – Mensagem recebida pelo servidor de aplicação contendo a carga útil (FRM-Payload) e alguns metadados da mensagem.



The screenshot displays the 'APPLICATION DATA' interface. At the top, there is a breadcrumb trail: Applications > devtest-01 > Devices > acsip-node > Data. Below this, the title 'APPLICATION DATA' is shown. A 'Filters' section contains buttons for 'uplink', 'downlink', 'activation', 'ack', and 'error'. A table with columns 'time', 'counter', and 'port' shows a single entry: '16:14:27', '0', and '2'. To the right of this entry, the text 'payload: 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A' is displayed. Below the table, there are sections for 'Uplink', 'Payload', 'Fields', and 'Metadata'. The 'Payload' section shows the hex string '00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A'. The 'Fields' section indicates 'no fields'. The 'Metadata' section contains a JSON object with the following structure:

```
{
  "time": "2019-05-21T19:14:27.851583963Z",
  "frequency": 902.3,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF10BW125",
  "coding_rate": "4/5",
  "gateways": [
    {
      "gtw_id": "eui-b827ebffff12eb5b",
      "timestamp": 2824646469,
      "time": "",
      "channel": 0,
      "rssi": -63,
      "snr": 11
    }
  ]
}
```

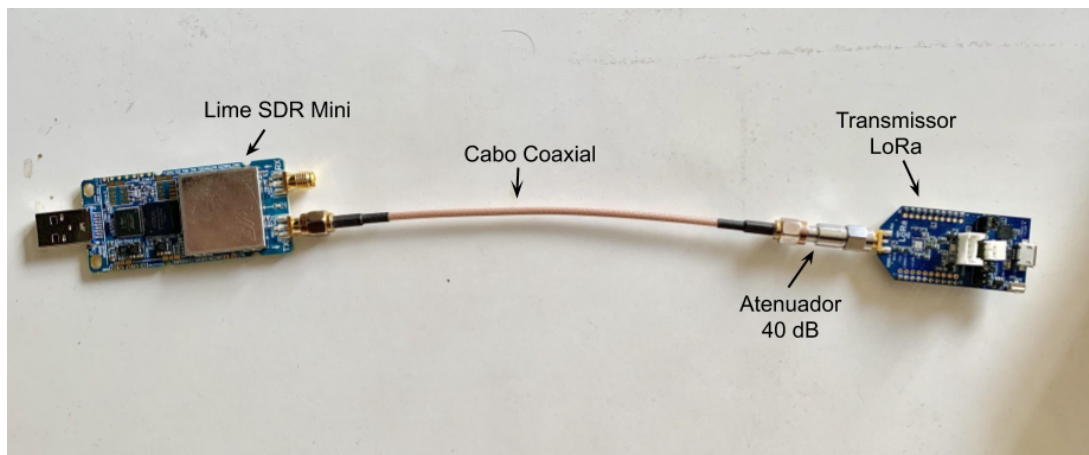
A partir dos dados obtidos nos dois casos analisados é possível concluir que o nó transmissor implementado é capaz de criar um pacote LoRa e transmiti-lo em uma rede LoRaWAN com sucesso. Analogamente, é possível concluir que o *gateway* implementado é capaz de receber pacotes da camada física LoRa e encaminhá-los para um servidor. Portanto, o enlace de rádio criado é válido e opera como o esperado.

4.2 Aquisição da Forma de Onda LoRa

O experimento descrito nessa seção tem por objetivo capturar as formas de onda LoRa com diferentes parâmetros para a visualização e entendimento do funcionamento da modulação. A partir dos dados adquiridos, são fornecidos o espectrograma e a Transformada de Fourier rápida (FFT) do sinal. Para a realização da aquisição das formas de onda LoRa

no contexto da rede LoRaWAN é realizado um experimento confinado utilizando o nó transmissor, um SDR e um atenuador fixo de 40 dB para evitar a saturação do sinal de entrada no SDR. A configuração do experimento encontra-se na Figura 29 abaixo.

Figura 29 – Montagem do experimento para a captura de sinais LoRa para análise posterior.



O nó transmissor é configurado para enviar pacotes LoRaWAN a cada cinco segundos, durante 30 segundos. O objetivo do envio de mais de um pacote sucessivo é para que o receptor capture mais de uma amostra da forma de onda, tornando possível a escolha da melhor para a análise. Esse procedimento é realizado quatro vezes e, em cada uma delas, o dispositivo possui uma configuração de forma de onda diferente. As configurações utilizadas cobrem todas as possibilidades de forma de onda de um dispositivo classe A operando na região US915 e estão dispostas na Tabela 12. A carga útil de aplicação (FRMPayload) utilizada é de 11 *bytes* e é mantida a mesma durante todos os cenários de teste a fim de avaliar e validar a diferença do tempo no ar das mensagens. Todas as mensagens foram transmitidas no canal 0, cuja frequência central é de 902,3 MHz.

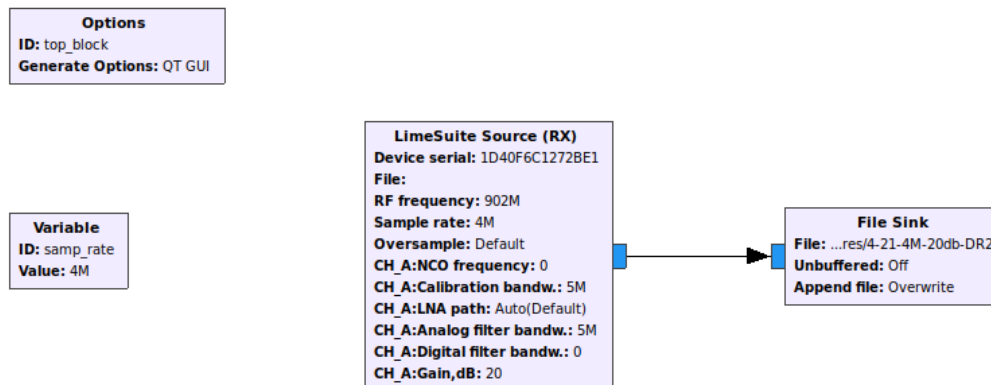
O SDR é utilizado como um receptor e é pareado com o software GNURadio, responsável pela configuração do dispositivo e armazenamento das amostras em um arquivo. O diagrama de blocos utilizado na aquisição de amostras das formas de onda da modulação LoRa é composto por apenas dois blocos, como mostra a Figura 30. O primeiro bloco é parte do pacote *gr-limesdr*, que é responsável pela abstração do hardware das diversas versões dos SDRs da Myriad RF. Denominado de *LimeSuite Source*, esse bloco tem o intuito de configurar o LimeSDR Mini como um receptor e fornece como saída um número complexo de 32 bits para cada amostra capturada. O segundo bloco, denominado de *File Sink*, é responsável pela gravação das amostras obtidas na saída do primeiro bloco em um arquivo cujo nome é especificado. O *top block* é um bloco de configuração do ambiente do *gnuradio-companion* e *samp_rate* é uma variável que contém a taxa de amostragem do sistema.

Tabela 12 – Resumo dos parâmetros de ativação ABP do dispositivo transmissor.

Configuração	Parâmetro	Valor
1 (DR0)	Fator de Espalhamento (SF)	10
	Largura de Banda	125 kHz
	Taxa de Código (CR)	4/5
	Taxa de Dados Nominal	980 bps
2 (DR1)	Fator de Espalhamento (SF)	9
	Largura de Banda	125 kHz
	Taxa de Código (CR)	4/5
	Taxa de Dados Nominal	1760 bps
3 (DR2)	Fator de Espalhamento (SF)	8
	Largura de Banda	125 kHz
	Taxa de Código (CR)	4/5
	Taxa de Dados Nominal	3125 bps
4 (DR3)	Fator de Espalhamento (SF)	7
	Largura de Banda	125 kHz
	Taxa de Código (CR)	4/5
	Taxa de Dados Nominal	5470 bps

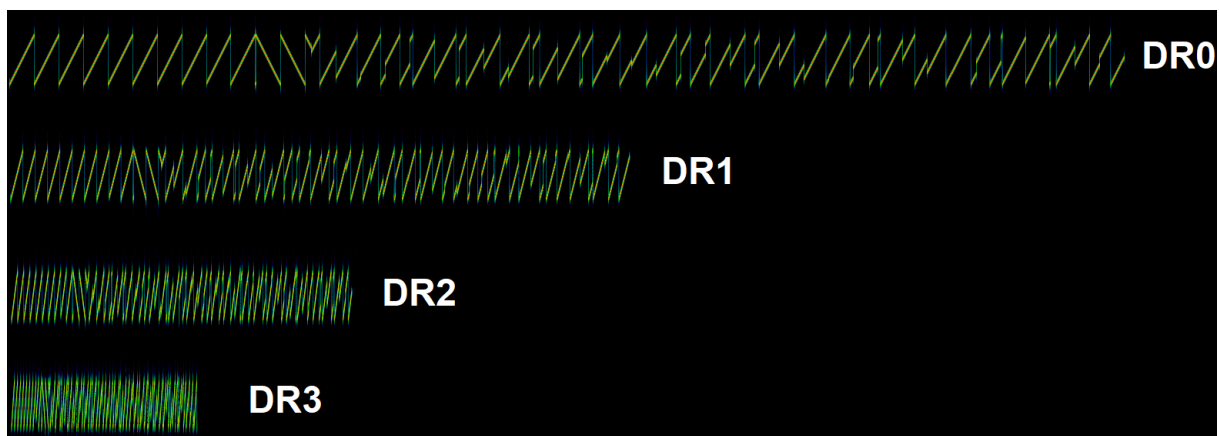
Para a captura do sinal é escolhida uma taxa de amostragem de 4 milhões de amostras por segundo, permitindo que seja visualizada uma largura de banda de 4 MHz. A frequência central do receptor, inserida no bloco *LimeSuite Source (RX)*, é de 902MHz. Essa frequência foi escolhida para estar 300kHz deslocada do sinal a ser recebido devido a uma falha de hardware do SDR, que faz com que o mesmo apresente um nível DC na frequência central de recepção. Desse modo, é possível que o sinal seja avaliado com maior clareza.

Figura 30 – Diagrama de blocos necessário para a captura de sinais modulados LoRa.



Utilizando a configuração experimental acima é possível então obter os espectrogramas de um sinal LoRa. A Figura 31 representa o espectrograma de cada um dos sinais transmitidos de acordo com a Tabela 12. A visualização do espectrograma se dá através da utilização do software livre Inspectrum, que tem como entrada as amostras IQ coletadas com o digrama de blocos da Figura 30 e a frequência de amostragem utilizada no processo de coleta. Esse software permite, ainda, a customização dos parâmetros de visualização do espectrograma, assim como o fornecimento da forma de onda no domínio do tempo e a extração de alguns parâmetros do espectrograma via interface gráfica. Para a geração da Figura 31 é utilizado o mesmo tamanho da janela para a realização da FFT, a mesma quantidade de *zoom* e os mesmos parâmetros de visualização.

Figura 31 – Espectrograma dos diferentes sinais LoRa capturados. O eixo horizontal da de cada um dos quatro sinais na figura representa o tempo, enquanto que o vertical representa a frequência.



A partir da Figura 31 observa-se claramente a diferença entre o tempo no ar de sinais enviados com a mesma carga útil de aplicação (11 *bytes*, neste caso). Essa diferença reitera um dos principais princípios de construção das redes LPWAN, que é o compromisso assumido entre a taxa de dados e o alcance do sinal. Observa-se que a utilização de um fator de espalhamento mais alto (i.e. 10) reduz drasticamente a taxa de dados nominal do dispositivo quando comparado a utilização de fatores de espalhamento mais baixos (i.e. 7). A redução da taxa de dados permite com que a energia irradiada por símbolo e o ganho de processamento sejam maiores, gerando um aumento na capacidade do sinal de suprimir interferências e, conseqüentemente, aumentando o alcance do enlace de rádio.

Observa-se ainda que cada símbolo é composto de um sinal cuja frequência varia linearmente com o tempo, dando origem ao denominado *chirp*. Considerando que os sinais capturados estão na banda base, observa-se que cada *chirp* possui uma frequência inicial f_0 e uma frequência final f_1 de tal modo que a largura de banda do sinal é dada por $BW = f_1 - f_0$. No caso dos sinais observados na Figura 31, a largura de banda (cujo valor

equivale a taxa de chips por segundo R_c) é de 125kHz e todos os *chirps* observados estão contidos dentro desta.

Utilizando a interface gráfica do software Inspectrum, são medidos ainda o tamanho do pacote em símbolos, seu tempo no ar, a taxa de símbolos e o período de cada símbolo para cada uma das configurações utilizadas. Os resultados encontram-se na Tabela 13. Esses valores podem ser validados através das equações 2.2, 2.3 e 2.7 a 2.10, apresentadas na Seção 2.2, como mostra a tabela 14. Nota-se que o tempo no ar dos pacotes não é proporcional ao número de símbolos, visto que a modulação insere alguns períodos de inatividade para que o receptor possa realizar a devida sincronização em tempo e/ou frequência. É importante notar ainda que o número de símbolos que compõe cada pacote é dado pela soma dos tamanhos do PHDR, PHDR_CRC, PHYPayload e CRC, sendo que apenas o campo PHYPayload apresenta informações úteis ao usuário.

Tabela 13 – Resultados das medições dos parâmetros dos sinais LoRa capturados. Os pacotes foram transmitidos utilizando uma carga útil de aplicação de 11 *bytes*, sendo a carga útil total (PHYPayload) de 24 *bytes*.

Parâmetro	DR0	DR1	DR2	DR3
Tamanho do Preâmbulo (<i>símbolos</i>)	12	12	12	12
Tamanho da Informação (<i>símbolos</i>)	33	38	43	48
Tamanho do Pacote (<i>símbolos</i>)	45	50	55	60
Taxa de Símbolo (<i>símbolos/s</i>)	122,07	244,141	488,281	976,562
Período de Símbolo (<i>ms</i>)	8,192	4,096	2,048	1,024
Tempo no Ar (<i>ms</i>)	371,992	205,952	113,152	61,824

Tabela 14 – Parâmetros dos pacotes calculados com base nas equações 2.2, 2.3 e 2.7 a 2.10.

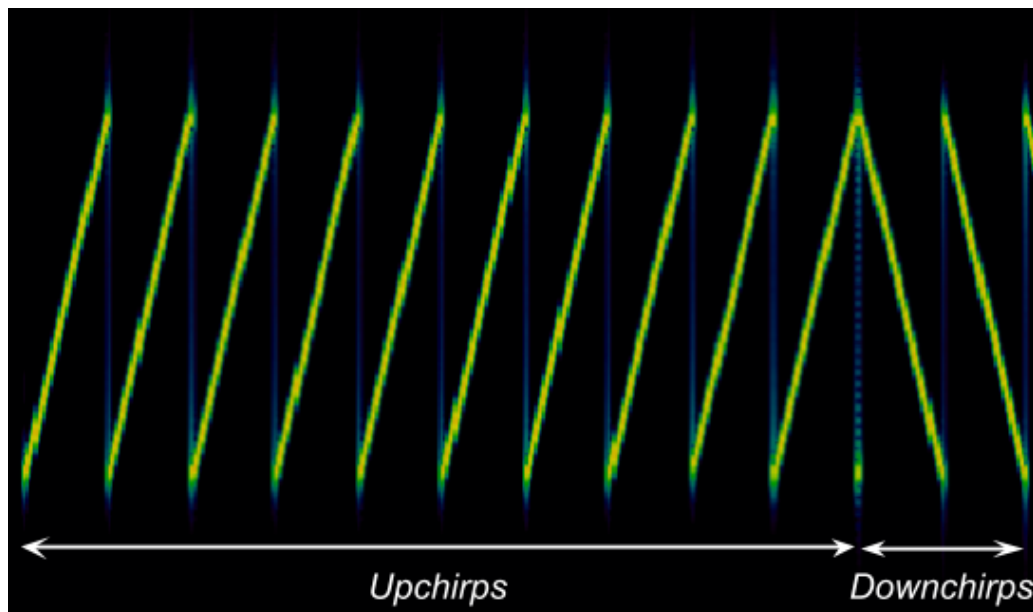
Parâmetro	DR0	DR1	DR2	DR3
Tamanho do Preâmbulo (<i>símbolos</i>)	12	12	12	12
Tamanho da Informação (<i>símbolos</i>)	33	38	43	48
Tamanho do Pacote (<i>símbolos</i>)	45	50	55	60
Taxa de Símbolo (<i>símbolos/s</i>)	122,07	244,141	488,281	976,563
Período de Símbolo (<i>ms</i>)	8,192	4,096	2,048	1,024
Tempo no Ar (<i>ms</i>)	403,456	222,208	121,344	65,792

Comparando os valores calculados presentes na Tabela 14 com os da Tabela 13 observa-se que, com exceção do tempo no ar, todos os parâmetros estão de acordo com os medidos. O erro na taxa de símbolo dos pacotes transmitidos com DR3 é atribuído à resolução do software Inspectrum. Observa-se, no entanto, que o tempo no ar do pacote medido é menor do que o valor calculado teoricamente. Tal discrepância pode ser

atribuída como uma medida preventiva no projeto da rede, onde busca-se superestimar o valor do tempo no ar da mensagem para que haja um limite de tolerância para com as regulamentações do espectro não licenciado.

A partir da Tabela 13 observa-se que o tamanho do preâmbulo é constante para os sinais LoRa dentro do contexto da rede LoRaWAN, independentemente da configuração utilizada. Esse preâmbulo é composto de 10 *upchirps* (ou símbolos), cuja a frequência na banda base varia de $f_0 = -62,5\text{kHz}$ a $f_1 = +62,5\text{kHz}$ e 2 *downchirps*, cuja frequência varia de $f_0 = +62,5\text{kHz}$ a $f_1 = -62,5\text{kHz}$. Esses *chirps* são denominados de não modulados, visto que não carregam nenhum tipo de informação. Essa configuração cumpre dois propósitos no receptor. O primeiro deles é a notificação de que um novo pacote está chegando. O segundo é a sincronização temporal e/ou de frequência do receptor. Além disso, os dois *downchirps* observados delimitam o preâmbulo e servem como um sinalizador do início da carga útil do pacote. A Figura 32 representa graficamente o preâmbulo de um pacote LoRa.

Figura 32 – Espectrograma do preâmbulo dos pacotes LoRa.

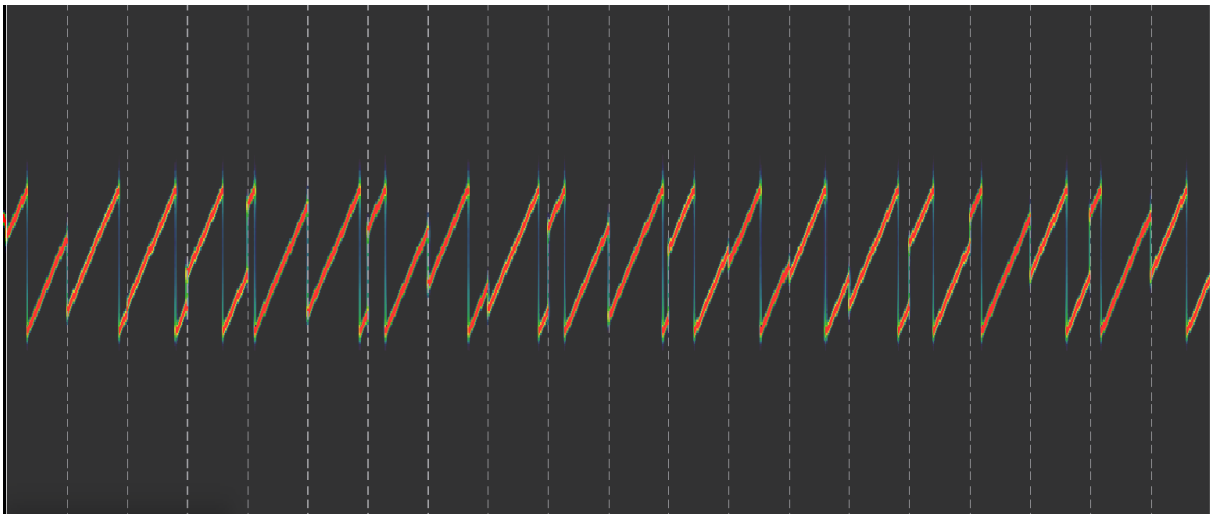


Segundo (SFORZA, 2010) e (SELLER; SORNIN, 2013), para que seja possível realizar a sincronização do receptor é necessário que a fase dos *upchirps* e *downchirps* que compõe o preâmbulo seja a mesma em f_0 e f_1 . Se essa condição for atendida, ao receber a sequência de *chirps* do preâmbulo o receptor é capaz de estimar de maneira precisa o deslocamento de frequência entre um sinal recebido e seu oscilador interno. Para tal, o receptor gera localmente um *chirp* não modulado que é o complexo conjugado do recebido. A multiplicação dos dois *chirps* (localmente gerado e recebido) ponto a ponto resulta em um sinal que, quando realizada a FFT, fornece um pico de energia deslocado da origem

por um montante que equivale ao descasamento de frequência entre o sinal recebido e o receptor. Essa particularidade dos *chirps* permite com que o receptor sincronize seu oscilador interno durante a recepção do sinal.

Após o preâmbulo é iniciada a sequência de *chirps* modulados que carregam a informação contida no pacote. Segundo (SEMTECH, 2015), a modulação LoRa é definida como uma variação da modulação CSS. Nela, a informação está codificada no deslocamento de frequência de cada um dos *chirps*. Observa-se então que o início de cada um dos símbolos se dá em um valor de frequência f_i e varia linearmente até o limite superior da banda f_1 . Ao atingir o limite superior da banda, a frequência retorna ao limite inferior f_0 e continua variando até f_f , onde atinge seu valor inicial novamente ($f_f = f_i$) (SFORZA, 2010). Essa variação linear da frequência cria o efeito visual de que cada um dos *chirp* se envolve em torno da largura de banda utilizada. A Figura 33 apresenta uma sequência de símbolos delimitados verticalmente pelas linhas tracejadas.

Figura 33 – Espectrograma de uma sequência de *chirps* modulados. As linhas verticais delimitam cada um dos símbolos apresentados.



O processo de demodulação do sinal ocorre de maneira similar à utilizada para sincronização temporal e de frequência do receptor. Os símbolos recebidos são multiplicados ponto a ponto pelo complexo conjugado de um *chirp* de referência não modulado gerado localmente pelo receptor. No caso dos símbolos apresentados na Figura 33, o receptor gera um *downchirp* não modulado para realizar a multiplicação. É realizada a FFT do resultado da multiplicação, que resulta em um pico de energia no instante que equivale ao valor do símbolo, ou seja, mede-se o deslocamento em frequência do *chirp* (SFORZA, 2010). Portanto, para que a tomada de decisão sobre o valor do símbolo seja feita de maneira precisa, é imperativo que a sincronização do receptor seja feita de maneira precisa na recepção do preâmbulo.

A partir dos sinais coletados é possível validar os parâmetros dados pelas equações apresentadas na Seção 2.2 para as diferentes formas de onda LoRa. Além disso, estes resultados fornecem uma visualização gráfica a estrutura do pacote de camada física, sendo possível identificar os *chirps* não modulados que compõem o preâmbulo e os *chirps* modulados que contém a informação do pacote. Finalmente, estes resultados facilitam o processo de entendimento de como a modulação LoRa utiliza os *chirps* para a transmissão de informação.

4.3 Análise de Comunicação Sob Coexistência

A análise de comunicação sob coexistência realizada tem por objetivo avaliar o comportamento da modulação LoRa quando exposta a um interferente. O experimento projetado para realizar a avaliação é realizado em um ambiente confinado. Essa escolha se baseia em dois principais fatores. O primeiro é de que os materiais utilizados possuem limitações de potência de saída, sendo impossível atingir os níveis de interferência desejados sem que se faça uso de amplificadores de sinal. O segundo fator é a ausência de um ambiente livre de irradiações causadas por fontes externas (i.e. câmara anecoica). Portanto, o ambiente confinado escolhido se torna a melhor opção para a realização de um experimento controlado.

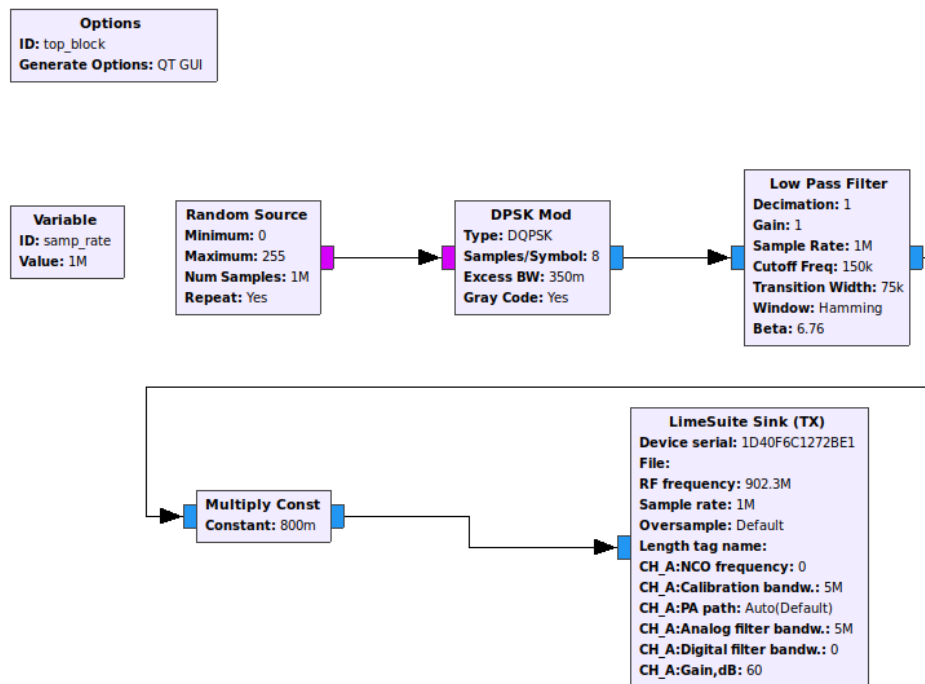
Como interferente é escolhido um sinal com modulação *differential quadrature phase shift keying* (DQPSK) com largura de banda efetiva de 162 kHz, de tal modo que este ocupe toda a largura de banda do sinal LoRa transmitido no experimento. A frequência da portadora escolhida é de 902,3 MHz, visto que essa é a frequência da portadora utilizada no sinal LoRa. Para a geração deste é feito uso do diagrama de blocos contido na Figura 34, que é gerado no software GNU Radio. O espectro de frequência do sinal pode ser visto na Figura 35. A descrição dos blocos utilizados na geração do sinal encontra-se abaixo.

Random Source é o bloco responsável pela geração dos *bytes* que são alimentados ao modulador. Nele são geradas um milhão de amostras aleatórias, que são continuamente injetadas no modulador. Ao chegar na última amostra o bloco reinicia o ciclo, a fim de manter a geração do interferente constante durante todo o experimento.

DQPSK Mod é o bloco responsável pela modulação do sinal na banda base. A modulação utilizada é a DQPSK, com 8 amostras por símbolo e um fator de *roll-off* de $\alpha = 0,35$.

Low Pass Filter é um filtro passa baixas aplicado no sinal da banda base. Esse filtro é utilizado para minimizar a irradiação de ruídos fora da banda de interesse pelo SDR. A frequência de corte adotada é de 150 kHz, com uma faixa de transição de 75 kHz.

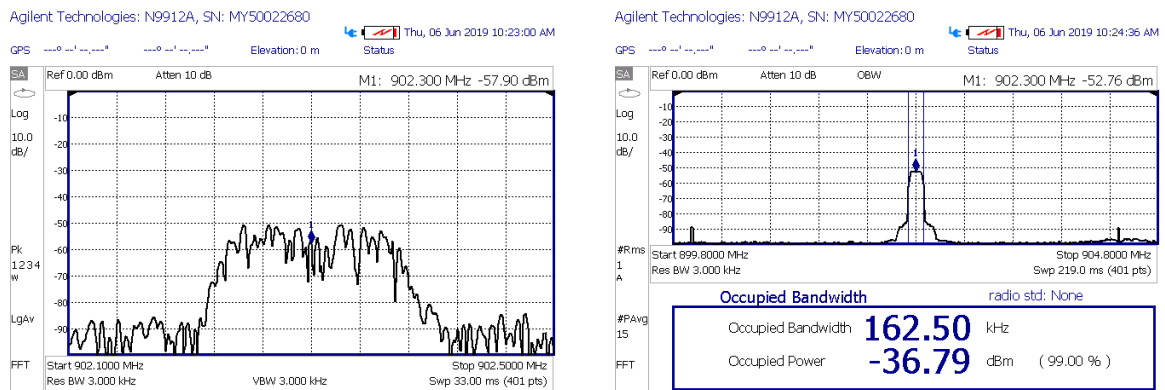
Figura 34 – Diagrama de blocos utilizado para a geração do sinal interferente DQPSK.



Multiply Const é um bloco que realiza a multiplicação do sinal modulado na banda base por uma constante. O valor da constante escolhida é de 0,8, e tem como objetivo reduzir a amplitude do sinal para evitar a saturação do amplificador de potência do SDR.

Lime Suit Sink (TX) é o bloco de transmissão do SDR. Nele é definida a frequência da portadora a ser aplicada no sinal (902,3 MHz, neste caso). É aplicado, ainda, um ganho de 60 dB no amplificador de potência, a fim de maximizar a potência da interferência gerada.

Figura 35 – Espectro de frequência do sinal DQPSK utilizado como interferência.



(a) Espectro de frequência.

(b) Largura de banda ocupada.

O primeiro passo na realização do experimento consiste na realização da calibração do sistema. O propósito desse procedimento é medir a potência dos sinais de saída do nó transmissor LoRa e do sinal interferente, a atenuação causada pelo combinador de sinais utilizado e a atenuação real do atenuador de faixa variável e do atenuador fixo utilizados. Para tal, fez-se uso da ponteira de medição potência, conectada ao analisador de espectro via USB. O nó transmissor LoRa é configurado para emissão de uma onda contínua (CW) com 20 dBm de potência de saída, centrada na frequência de 902,3 MHz.

Para o transmissor LoRa, a potência do sinal é medida em três configurações diferentes. A primeira consiste na medição da potência do sinal de saída do dispositivo e, para tal, o transmissor é ligado diretamente à ponteira de medição (Figura 36a). Na segunda configuração, o transmissor é conectado diretamente a uma das portas de entrada do combinador de sinais, enquanto que uma carga de 50 Ohms é ligada à outra porta de entrada a fim de evitar reflexões no sinal (Figura 36b). A terceira configuração utilizada repete a segunda, porém é inserido um atenuador fixo de 40 dB entre a saída do transmissor e a porta de entrada do combinador à qual este estava conectado previamente (Figura 36c). As configurações utilizadas encontram-se na Figura 36 e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 15.

Figura 36 – Configurações de medidas de potência para calibração do dispositivo LoRa. (a) Medição da potência de saída do kit EK-S76SXB . (b) Medição da potência de saída do kit EK-S76SXB ligado ao divisor de sinais. (c) Medição da potência de saída do kit EK-S76SXB ligado ao divisor de sinais e atenuado de 40dB

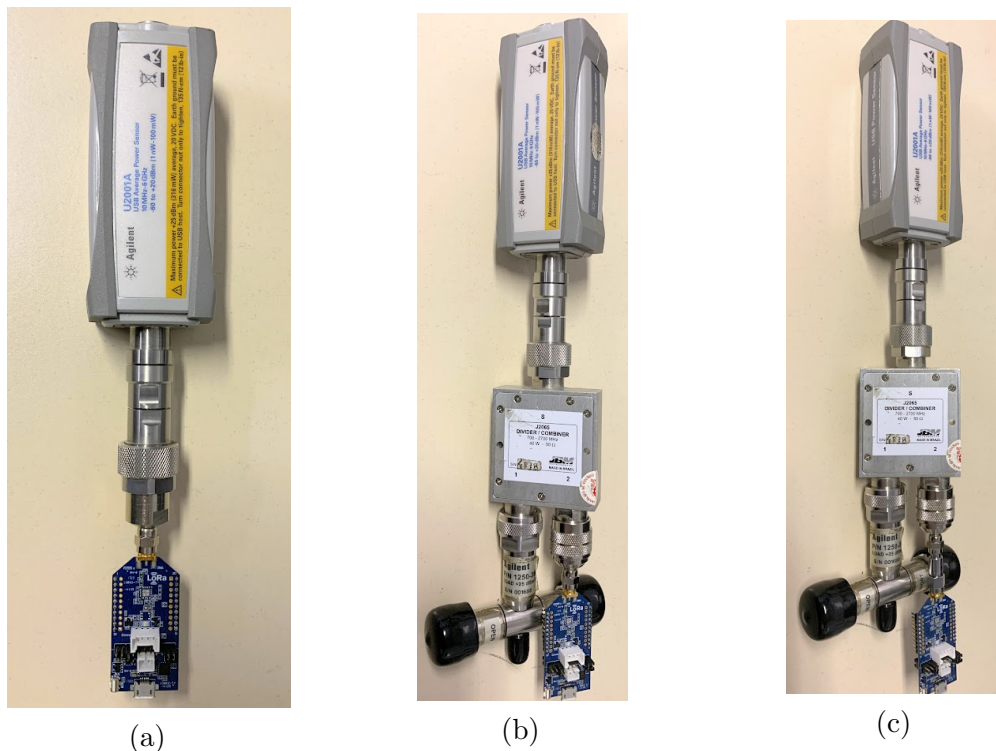


Tabela 15 – Resultados da calibração de potência do sinal LoRa. A potência de saída do sinal é a potência medida diretamente na saída do nó transmissor.

Potência de Saída (dBm)	Atenuação Nominal (dB)	Potência do Sinal (dBm)	Atenuação Real (dB)
16,6	0	13,58	3,02
16,6	40	-26,85	40,43

O procedimento de calibração para o sinal interferente é realizado em duas configurações. Para ambas as configurações o SDR é configurado para transmitir o sinal interferente DQPSK de maneira contínua e com potência máxima. A primeira configuração utilizada consiste na ligação direta do SDR com a ponteira, visando medir a potência na qual o dispositivo é capaz de transmitir (Figura 37a). A segunda configuração consiste na ligação do SDR em uma das extremidades do atenuador duplo variável através de um cabo coaxial. A segunda extremidade do atenuador é ligada à uma das portas de entrada do combinador de sinais. Uma carga de 50 Ohms é ligada à outra porta de entrada do combinador a fim de evitar reflexões do sinal. A saída do combinador é, então, ligada à ponteira de medição (Figura 37b). São realizadas medições consecutivas atenuando o sinal de 20 dB a 40 dB em passos de 10dB e de 10 dB a 20 dB em passos de 1 dB. As configurações do processo de calibração do interferente encontram-se na Figura 37 e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados da calibração de potência do sinal interferente. A potência de saída do sinal é a potência medida diretamente na saída do SDR utilizada para a transmissão.

Potência de Saída (dBm)	Atenuação Nominal (dB)	Potência do Sinal (dBm)	Atenuação Real (dB)
0	0	-3,99	3,99
0	11	-14,57	10,58
0	12	-15,65	11,66
0	13	-16,68	12,69
0	14	-17,66	13,67
0	15	-18,69	14,70
0	16	-19,66	15,67
0	17	-20,66	16,67
0	18	-21,65	17,66
0	19	-22,65	18,66
0	10	-13,82	9,83
0	20	-23,86	19,87
0	30	-33,92	29,93
0	40	-43,82	39,83

Figura 37 – Configurações de medidas de potência para calibração da interferência. (a) Medição da potência de saída do LimeSDR Mini. (b) Medição da potência de saída do LimeSDR Mini ligado ao divisor de sinais através do atenuador variável.



(a)

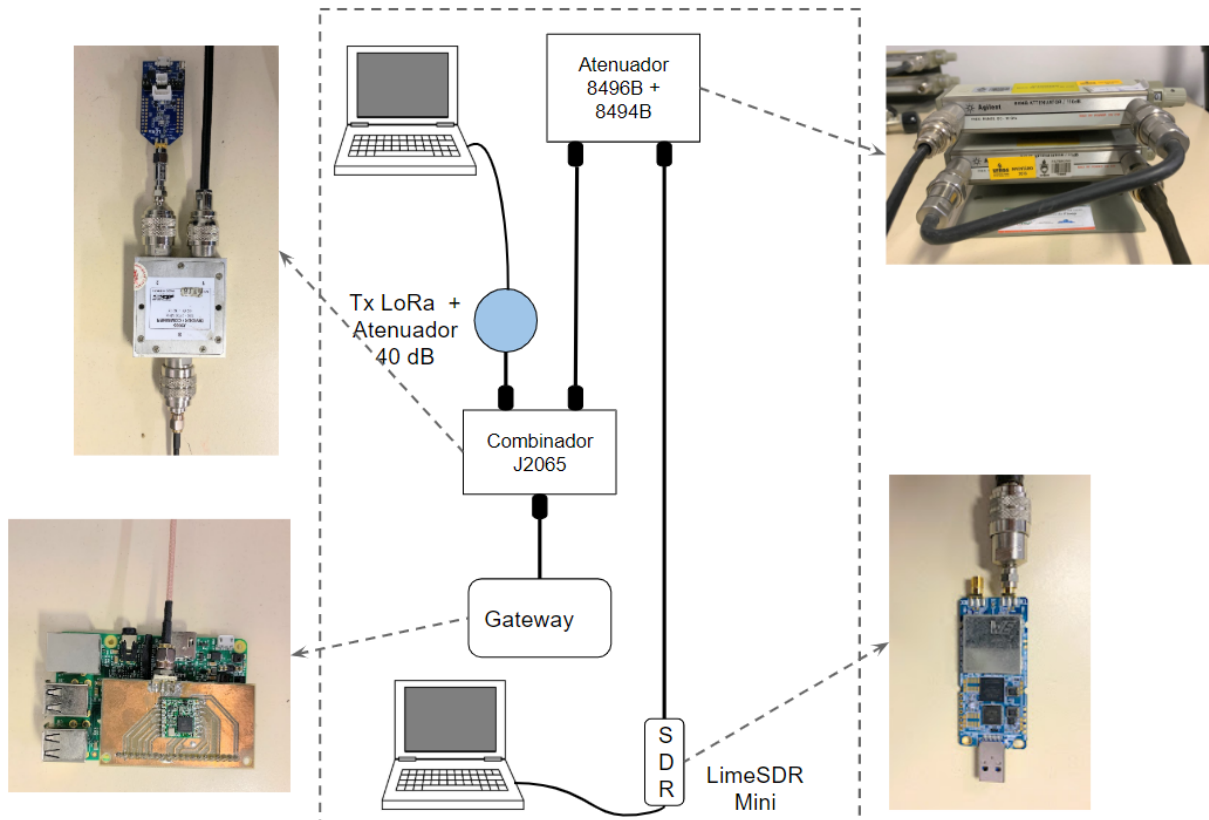


(b)

A configuração do experimento é apresentada na Figura 38. O nó transmissor LoRa é conectado ao atenuador fixo de 40dB e ligado a uma das portas do combinador de sinais. Na porta secundária do combinador de sinais é ligado, através de um cabo coaxial, o duplo atenuador de faixa variável. Na outra ponta do atenuador encontra-se conectado um SDR responsável pela geração do sinal interferente. Por fim, o *gateway* é conectado a porta de saída do combinador de sinais através de um cabo coaxial. O transmissor LoRa é conectado a um computador que é responsável pela configuração do dispositivo, além da aquisição do número de pacotes enviados via interface UART. Um outro computador utilizado no experimento é responsável pela geração do diagrama de blocos do transmissor DQPSK através do software GNU Radio. Este computador também é responsável pelo recebimento dos pacotes diretamente do servidor de aplicação da rede *The Things Network*

através do protocolo MQTT. O *gateway* conecta-se com o servidor da rede via Wi-Fi e encaminha os pacotes para a sua validação.

Figura 38 – Configuração do experimento de análise de comunicação sob coexistência.



Para a realização do experimento o atenuador duplo variável, responsável pela atenuação do sinal interferente, é fixado inicialmente em 40 dB. O nó transmissor LoRa é programado para enviar uma mensagem a cada 5 segundos, enviando um total de 1000 pacotes por repetição do teste. A cada 1000 pacotes enviados, o valor da atenuação do sinal interferente é diminuído de 10 dB até chegar a um mínimo de 20 dB. A partir desse valor, a atenuação é diminuída em intervalos menores, buscando encontrar o ponto em que há uma perda de pacotes significativa. O experimento busca avaliar de maneira prática a robustez do sinal LoRa contra interferências e, para tal, são escolhidas as duas taxas de dados extremas possíveis em dispositivos operantes na região US915 da rede LoRaWAN. Na primeira repetição do experimento é utilizada a taxa de dados DR0, enquanto que na segunda a taxa de dados é a DR3. Ambos os experimentos são realizados com o dispositivo transmitindo a mesma carga útil de aplicação de 11 *bytes* e a largura de banda do sinal é de 125kHz.

O procedimento de recepção, demodulação, detecção e correção de erros da camada física LoRa ocorrem diretamente no transceptor contido no *gateway*. Para o *host* são disponibilizados apenas a carga útil da mensagem da camada física (PHYPayload),

encriptada pela NwkSKey e AppSKey, e os metadados da mensagem (apresentados na Seção 4.1). Tendo em vista essa limitação, opta-se por avaliar a taxa de erro de pacote em relação à sua relação sinal-ruído, e não a taxa de erro de bits em cada pacote. Nota-se que, como mencionado na seção 4.1, a implementação do encaminhador de pacotes utilizado não descarta automaticamente os pacotes cuja CRC da carga útil não é válida e, portanto, todos os pacotes recebidos com sucesso pelo *gateway* são encaminhados ao servidor da rede. Para fins desta avaliação são considerados pacotes com erro aqueles que são descartados automaticamente pelo *gateway* devido a invalidez da CRC do *PHDR* (*PHDR_CRC*), e todos os pacotes cujo código de integridade de mensagem (*MIC*) é dado como inválido pelo servidor. A invalidez do *MIC* indica que os dados do pacote não são confiáveis, visto que há presença de erros. Para a validação do *MIC* é utilizado o servidor da rede *The Things Network*, visto que a decriptação do pacote com as devidas chaves e avaliação do *MIC* são realizados de maneira automática. Desse modo, a aplicação MQTT utilizada só encaminha os pacotes válidos ao computador responsável pela captação de tais dados. O resultado dos experimentos realizados encontram-se nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 – Resultados do experimento de análise de coexistência para um sinal LoRa transmitido com taxa de dados DR0 e CR = 4/5 em um ambiente com interferência DQPSK.

Parâmetros	Número do Experimento						
	1	2	3	4	5	6	7
Atenuação QPSK (dB)	40	30	20	15	13	11	10
Atenuação LoRa (dB)	40	40	40	40	40	40	40
Potência QPSK (dBm)	-43,82	-33,92	-23,86	-18,69	-16,68	-14,57	-13,82
Potência LoRa (dBm)	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85
SNR Lida Média (dB)	9,0	5,0	-5,8	-7,6	-9,0	-15,2	-18,0
RSSI Lida Média (dBm)	-36,6	-34,2	-25,1	-21,7	-20,0	-16,1	-16,4
Pacotes Enviados	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Pacotes Recebidos	999	993	994	996	980	984	5
Taxa de Erro de Pacote	0,1%	0,7%	0,6%	0,4%	2,0%	1,6%	99,5%

Os resultados fornecidos nas Tabelas 17 e 18 mostram que é possível com que pacotes sejam demodulados mesmo quando o nível de potência do sinal recebido está muito abaixo do nível de ruído. Para o caso dos pacotes transmitidos com taxa de dados DR0, observa-se que é possível atingir uma SNR de -15,2 dB no receptor ao custo de PER de apenas 1,6%. Já para o caso dos pacotes transmitidos com taxa de dados DR3 observa-se que a mínima SNR atingida com uma PER comparável de 1,3% é de -5,7 dB. No entanto, ao custo de uma PER maior é possível atingir uma SNR de até -7,5 dB. Os valores obtidos podem ser validados através da tabela 19, retirada da folha de especificações do transceptor SX1276. A partir desses resultados fica claro o compromisso assumido entre

Tabela 18 – Resultados do experimento de análise de coexistência para um sinal LoRa transmitido com taxa de dados DR3 e $CR = 4/5$ em um ambiente com interferência DQPSK.

Parâmetros	Número do Experimento					
	1	2	3	4	5	6
Atenuação QPSK (dB)	40	30	20	18	16	15
Atenuação LoRa (dB)	40	40	40	40	40	40
Potência QPSK (dBm)	-43,82	-33,92	-23,86	-21,65	-19,66	-18,69
Potência LoRa (dBm)	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85	-26,85
SNR Lida Média (dB)	8,7	4,0	-5,7	-7,0	-7,5	NI
RSSI Lida Média (dBm)	-35,0	-33,0	-25,0	-24,0	-25,2	NI
Pacotes Enviados	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Pacotes Recebidos	994	990	987	969	947	0
Taxa de Erro de Pacote (PER)	0,6%	1,0%	1,3%	3,1%	5,3%	100,0%

taxa de dados e robustez pela rede LoRaWAN. A partir dos resultados é possível concluir que a modulação LoRa, os métodos de sincronização do receptor e demodulação do sinal são extremamente eficientes e robustos na supressão de interferências de banda larga.

Tabela 19 – Valor da SNR mínima requerida na entrada do receptor SX1276 para que o sinal LoRa seja demodulado corretamente.

Fator de Espalhamento	SNR do demodulador
7	-5 dB
8	-7,5 dB
9	-10 dB
10	-15 dB

Fonte – Adaptado de (SEMTECH, 2019b)

Apesar dos resultados obtidos estarem de acordo com as especificações do transceptor utilizado no *gateway*, a ausência da leitura do registrador que apresenta o resultado da validação da CRC do pacote insere uma variável a mais no experimento. Essa variável é a comunicação do *gateway* com o servidor, que depende de uma conexão estável à Internet. Portanto, os experimentos aqui realizados e descritos podem ser otimizados através da modificação do encaminhador de pacotes utilizado no *gateway* a fim de adicionar suporte ao descarte imediato da PHYPayload de pacotes cuja CRC não é válida. Desse modo, tem-se a certeza de que os pacotes recebidos pelo *host* e apresentados nas notificações do processo possuem uma CRC válida e, então, o encaminhamento dos pacotes ao servidor para a validação torna-se desnecessária. Assim sendo, a variável que diz respeito à conexão do *gateway* com a Internet é eliminada.

Considerando que os valores da PER de 1,6% para pacotes transmitidos com DR0 e 5,3%, para pacotes transmitidos com DR3 são aceitáveis para uma dada aplicação, é possível ainda estimar a sensibilidade do receptor implementado no *gateway*. A sensibilidade do receptor pode ser definida pela Equação 4.1, onde o termo -174 representa o ruído de 1 Hz de banda em dBm, BW representa a largura de banda do sinal, NF é a figura de ruído do receptor em dB e SNR é a relação sinal ruído na entrada do receptor em dB (SEMTECH, 2019a).

$$S = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR \quad (4.1)$$

Para as configurações da modulação LoRa adotadas no experimento obtém-se os valores dados pelas Equações 4.2 e 4.3, em função da figura de ruído do receptor.

$$S_{DR0} = -174 + 10 \log_{10}(125000) - 15,2 + NF = -138,2 + NF \quad (4.2)$$

$$S_{DR3} = -174 + 10 \log_{10}(125000) - 7,5 + NF = -130,5 + NF \quad (4.3)$$

Os valores dados pelas Equações 4.2 e 4.3 mostram que a sensibilidade do receptor dependem da figura de ruído deste. Tendo em vista que este valor não é conhecido para o *gateway* implementado neste trabalho, adota-se um valor de $NF = 6$ dB como aceitável em uma implementação comercial (SEMTECH, 2019a). A partir desse valor obtém-se então as sensibilidades $S_{DR0} = -132,2$ dBm e $S_{DR3} = -124,5$ dBm. Tais valores são considerados altos quando comparados a outras modulações utilizadas no cenário da Internet das Coisas. Adotando a potência máxima medida do nó transmissor LoRa desenvolvido como 16,6 dB (vide Tabela 15), é possível então obter um *link budget* de 148,8 dB quando os pacotes são transmitidos com DR0 e 141,1 dB para pacotes transmitidos com DR3. Tais valores são capazes de justificar o longo alcance da rede LoRaWAN e demonstram o compromisso assumido entre a taxa de dados e o alcance da rede.

5 Conclusão

Neste trabalho é realizada uma análise da camada física e de coexistência da rede LoRaWAN, uma rede LPWA que tem por objetivo fornecer um enlace de rádio de longo alcance ao custo de um consumo de energia relativamente baixo. Desse modo, a rede LoRaWAN permite com que nós sensores com autonomia energética de anos, baseada em baterias como células primárias de lítio do tipo moeda, sejam dispostos em lugares remotos sob a cobertura de um único *gateway*, que pode estar a quilômetros de distância. Para tal, a rede LoRaWAN assume um compromisso entre a taxa de dados da transmissão e o alcance da rede, sendo que para atingir maiores distâncias o sinal deve ser transmitido com uma taxa de dados menor.

Para realização do trabalho, foi implementado um nó transmissor LoRa com base na implementação de referência da camada MAC LoRaWAN (denominada LoRaMAC-node). Um *gateway* receptor de único canal e fator de espalhamento baseado na implementação do encaminhador de pacotes criada por (BOKSEM, 2016) foi desenvolvido para criação do enlace de rádio LoRaWAN. O enlace de rádio criado foi validado por meio da transmissão de pacotes no meio eletromagnético. Uma análise da camada física LoRa foi realizada utilizando formas de onda capturadas com um rádio definido por software e inteligência de software livre, buscando entender o funcionamento da modulação e o processo utilizado para recepção no *gateway*. Por fim, uma análise de comunicação sob coexistência foi realizada para avaliar a robustez da modulação LoRa contra interferências.

A rede LoRaWAN conta com um ambiente de desenvolvimento baseado em software livre. As especificações da camada MAC são abertas tanto para o lado dos dispositivos transmissores como para as interfaces de *backend* e disponíveis ao público. A LoRa Alliance conta com implementações continuamente otimizadas da pilha de protocolo para a construção de dispositivos e *gateways* LoRaWAN, além de documentação extensa que permitem o entendimento dos parâmetros disponíveis para customização. Esse ambiente aberto de desenvolvimento alinhado com o suporte contínuo dos fabricantes facilita o desenvolvimento de aplicações e implementação de redes por parte dos usuários, tornando-se um agente crucial na adoção da tecnologia e popularização da rede.

A partir da análise da camada física da rede, LoRa, observa-se que esta é composta de um preâmbulo cujo objetivo é a notificação de que uma nova mensagem está chegando na entrada do receptor e a sincronização temporal e de frequência para realização da demodulação do sinal. As técnicas de sincronização adotadas pela modulação LoRa no receptor permitem com que este realize uma sincronização precisa e com baixo custo computacional a partir de blocos de rádio comumente utilizados em comunicações RF.

Além disso, o procedimento adotado permite com que os rádios sejam implementados com osciladores de baixo custo, visto que os *offsets* de frequência gerados localmente podem ser compensados no momento da recepção do sinal. A modulação do sinal em *chirps* codifica a informação em deslocamentos de frequência, fazendo com que o receptor possa utilizar o mesmo procedimento utilizado na sincronização no processo de demodulação.

Através do experimento de análise de comunicação sob coexistência realizado observa-se que a camada física da rede LoRaWAN é extremamente robusta contra interferências de banda larga, sendo capaz de demodular sinais muito abaixo do chão de ruído. Atribui-se esta robustez a sua modulação baseada em *chirps*, associada ao uso de técnicas de correção de erro em avanço, que tornam o receptor capaz de detectar os símbolos transmitidos mesmo em condições extremas de interferência. Essa capacidade permite com que a sensibilidade do receptor seja maximizada, aumentando o *link budget* e, conseqüentemente, o alcance da rede. Portanto, a robustez da modulação está diretamente associada ao alto alcance da rede. Observa-se ainda que a capacidade de supressão de interferências cai com o fator de espalhamento utilizado na modulação do sinal, visto que o ganho de processamento da modulação é menor. Tendo em vista que quanto menor o fator de espalhamento maior a taxa de dados de transmissão, foi possível observar claramente o compromisso entre a taxa de dados e o alcance da rede. Devido as regulações impostas à banda ISM, esse compromisso se estende ainda a quantidade de informação transmitida por pacote, sendo esta maximizada para taxa de dados maiores.

Apesar das suas limitações quanto a quantidade de dados transmitidos e a taxa de dados, a rede LoRaWAN permite a otimização de diversas aplicações de longo alcance, assim como a criação de inúmeras outras com base nas suas características. Sua configurabilidade permite com que a escolha dos parâmetros da modulação seja otimizada de acordo com as necessidades da aplicação. O ambiente de desenvolvimento baseado em software livre, alinhado com o custo relativamente baixo (quando comparado a outras tecnologias) dos componentes e de implementação da rede se tornam um diferencial importante no desenvolvimento de tecnologias para o cenário IoT, garantido assim seu sucesso.

Como trabalhos futuros, propõe-se a modificação da implementação do encaminhador de pacotes para que haja a verificação do CRC da carga útil no *gateway*. Desse modo, o procedimento de análise de comunicação sob coexistência pode ser realizado de maneira mais confiável, eliminando a variável que diz respeito à conexão com a Internet. O experimento de coexistência pode estendido ainda para as outras taxas de dados possíveis na rede LoRaWAN e outros sinais interferentes, tornando a análise mais completa. Além disso, propõe-se uma descrição matemática aprofundada (analítica e de um ponto de vista de processamento digital de sinais) do processo de modulação e demodulação do sinal. Tal descrição permite um melhor entendimento das propriedades da modulação LoRa e pode ser útil para implementação, ou otimização de blocos existentes, desta em SDRs.

Referências Bibliográficas

- ACSIP. *S76S LoRa Wireless Communication Module*. [S.l.], 2016. Version F.
- ANATEL. Resolução nº 454, de 11 de dezembro de 2006. aprova o regulamento sobre condições de uso de radiofrequências nas faixas de 800 mhz, 900 mhz, 1.800 mhz, 1.900 mhz e 2.100 mhz. *Diário Oficial da União*, 11 dez. 2006.
- APTE, P. et al. Advanced chip packaging satisfies smartphone needs. *IEEE Spectrum*, February 2011. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/advanced-chip-packaging-satisfies-smartphone-needs>>. Acesso em: 1 de Maio de 2019.
- BAUDLINE. *What is baudline?* 2010. Disponível em: <http://www.baudline.com/what_is_baudline.html>. Acesso em: 5 de Maio de 2019.
- BOKSEM, H. 2016. Disponível em: <https://github.com/bokse001/dual_chan_pkt_fwd/>. Acesso em: 1 de Novembro de 2018.
- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, v. 23, n. 5, p. 60–67, October 2016. ISSN 1536-1284.
- COMITTEE, L. A. T. *LoRaWAN Regional Parameters V1.0.2b*. 2017. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-regional-parameters-v102rb>>.
- FOUNDATION, R. P. *Raspberry Pi 3 Model B*. 2016. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>>. Acesso em: 1 de Maio de 2019.
- HOPERF. *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module*. [S.l.], 2017. Rev. 1.0. Disponível em: <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190301/RFM95_96_97_98W.pdf>. Acesso em: 27 de Abril de 2019.
- INTERNATIONAL COMMUNICATION UNION. *Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)*. [S.l.], 2009. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-E.pdf>. Acesso em: 10 de Abril 2019.
- KIRBY, A. *LoRaWAN 1.0.x packet decoder*. 2019. Disponível em: <<https://lorawan-packet-decoder-0ta6puiniaut.runkit.sh/>>. Acesso em: 21 de Maio de 2019.
- LABS, L. *An Overview of Narrowband IoT (NB-IoT)*. 2018. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/overview-of-narrowband-iot>>. Acesso em: 25 de Junho de 2019.
- LINK LABS. *A comprehensive look at Low Power, Wide Area Networks: For Internet of Things engineers and decision makers*. 2016. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/lpwan>>. Acesso em: 6 de Dezembro de 2018.

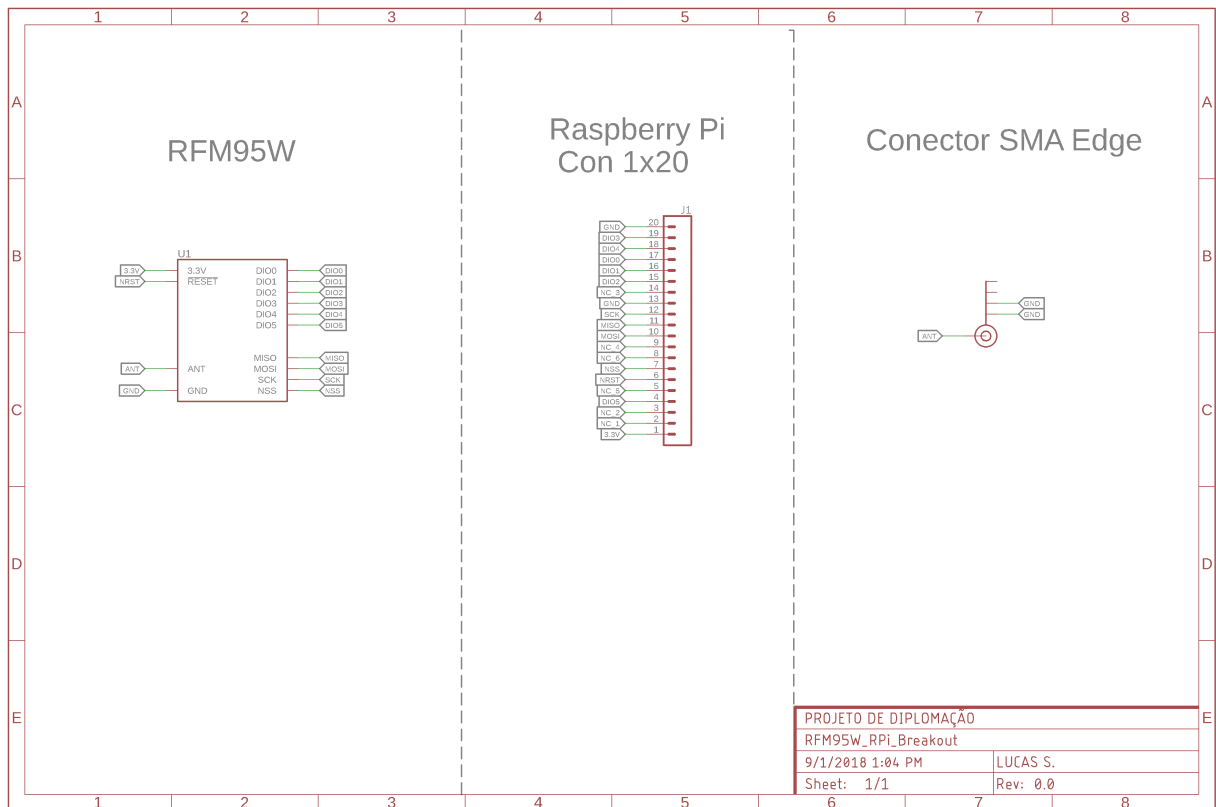
- LORA-ALLIANCE. *LoRaWAN What is it?: A technical overview of LoRa and LoRaWAN*. 2015. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>>. Acesso em: 12 de Novembro de 2018.
- MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, v. 5, n. 1, p. 1 – 7, 2019. ISSN 2405-9595.
- MYRIADRF. *LimeSDR-Mini v1.2 hardware description*. 2019. Disponível em: <https://wiki.myriardrf.org/LimeSDR-Mini_v1.2_hardware_description>. Acesso em: 10 de abril de 2019.
- NOKIA. *LTE Evolution for IoT Connectivity*. 2016. Disponível em: <<https://onestore.nokia.com/asset/200178>>. Acesso em: 10 de Dezembro de 2018.
- PASQUA, E. *LPWAN emerging as fastest growing IoT communication technology*. 2018. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>>. Acesso em: 9 de Dezembro de 2018.
- RADIO, G. *What is GNU Radio?* 2019. Disponível em: <<https://www.gnuradio.org/about/>>. Acesso em: 5 de Maio de 2019.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2002. ISBN 0130422320,9780130422323.
- RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855–873, Secondquarter 2017. ISSN 1553-877X.
- SECH, J. L. *Single Channel Packet Forwarder*. 2016. Disponível em: <https://github.com/jlesech/single_chan_pkt_fwd>. Acesso em: 10 de novembro de 2018.
- SEMTECH. Olivier Bernard André Seller e Nicolas Sornin. *Low Power Long Range Transmitter*. 2013. EP2763321A1, 02 jul. 2013, 06 jan. 2014.
- SEMTECH. *Semtech Acquires Wireless Long Range IP Provider Cycleo*. 2012. Disponível em: <<https://investors.semtech.com/static-files/a785a7e4-4099-4e56-8d6a-f69a98b24884>>. Acesso em: 10 de abril de 2019.
- SEMTECH. *AN1200.13: LoRa Modem*. 2013. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.13.pdf>>. Acesso em: 8 de Janeiro de 2019.
- SEMTECH. *AN1200.22: LoRa Modulation Basics*. 2015. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2018.
- SEMTECH. *SX1301 Datasheet*. [S.l.], 2017. Rev. 2.4. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1301.pdf>>. Acesso em: 10 de Abril 2019.
- SEMTECH. *SX1308 Datasheet*. [S.l.], 2017. Rev. 1.2. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1308.pdf>>. Acesso em: 10 de Abril 2019.
- SEMTECH. *LoRaWAN Academy*. 2019. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/resources/lorawan-academy>>. Acesso em: 1 de Junho de 2019.

- SEMTECH. *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*. [S.l.], 2019. Rev. 6. Disponível em: <https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V6.pdf>. Acesso em: 10 de Fevereiro 2019.
- SEMTECH; STACKFORCE. *LoRaMac-node API Documentation v4.4.1*. 2018. Disponível em: <<http://stackforce.github.io/LoRaMac-doc/>>. Acesso em: 1 de Agosto de 2018.
- SEMTECH; STACKFORCE. *LoRaMac-node v4.4.1*. 2018. Disponível em: <<https://github.com/Lora-net/LoRaMac-node/tree/v4.4.1>>. Acesso em: 1 de Agosto de 2018.
- CYCLEO. François Sforza. *Communications System*. 2010. EP2449690B1, 02 jul. 2010, 06 jan. 2016.
- SIGFOX. 2018. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/en>>. Acesso em: 29 de Novembro de 2018.
- SIGFOX. *Sigfox connected objects: Radio Specifications*. [S.l.], 2019. Rev. 1.3. Disponível em: <<https://build.sigfox.com/sigfox-device-radio-specifications>>. Acesso em: 10 de Abril 2019.
- SORNIN, N. et al. *LoRaWAN Specification V1.0.2*. 2016. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v102>>.
- TELKAMP, T. 2015. Disponível em: <https://github.com/tftelkamp/single_chan_pkt_fwd>. Acesso em: 1 de Novembro de 2018.
- TTN. *The Things Network*. 2019. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/>>. Acesso em: 10 de abril de 2019.
- WALTERS, M. *Inspectrum*. 2016. Disponível em: <<https://github.com/miek/inspectrum>>. Acesso em: 5 de Março de 2019.
- WANG, Y. E. et al. A primer on 3gpp narrowband internet of things (nb-iot). *CoRR*, abs/1606.04171, 2016. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1606.04171>>.

ANEXO A – Placa de *break out* do módulo RFM95W para *Raspberry Pi*

A.1 Esquemático

Figura 39 – Esquemático da placa de *breakout* com as ligações para o cabeçalho de pinos do *Raspberry Pi*.



A.2 Layout da Placa de Circuito Impresso

Figura 40 – Layout da placa de *breakout* fabricada.

