

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
Programa de Pós-Graduação em
Computação Aplicada

Dissertação de Mestrado

**REPETIDOR PARA REDES
LORAWAN COM ÊNFASE NA
AGRICULTURA**

SAMUEL ZOTTIS DAL MAGRO



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

**REPETIDOR PARA REDES LORAWAN COM
ÊNFASE NA AGRICULTURA**

Samuel Zottis Dal Magro

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

Orientador: Prof. Dr. Willingthon Pavan

Passo Fundo
2022

CIP – Catalogação na Publicação

D148r Dal Magro, Samuel Zottis
Repetidor para redes Lorawan com ênfase na agricultura
[recurso eletrônico] / Samuel Zottis Dal Magro. – 2022
8.2 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Willingthon Pavan.
Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) –
Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Internet das coisas. 2. Protocolo LoRaWAN. 3. Coleta
de dados. 4. Agricultura. I. Pavan Willingthon, orientador.
II. Título.

CDU: 004

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO ACADÊMICO

SAMUEL ZOTTIS DAL MAGRO

Aos trinta dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e dois, às dezesseis horas, realizou-se, de forma on-line, por meio de videoconferência, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso “Repetidor para redes LoRaWAN com ênfase na agricultura”, de autoria de Samuel Zottis Dal Magro, acadêmico do Curso de Mestrado em Computação Aplicada do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – PPGCA. Segundo as informações prestadas pelo Conselho de Pós-Graduação e constantes nos arquivos da Secretaria do PPGCA, o aluno preencheu os requisitos necessários para submeter seu trabalho à avaliação. A banca examinadora foi composta pelos doutores Willingthon Pavan, Marcelo Trindade Rebonatto e Jose Mauricio Cunha Fernandes. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a banca examinadora considerou o candidato **APROVADO**. Foi concedido o prazo de até quarenta e cinco (45) dias, conforme Regimento do PPGCA, para o acadêmico apresentar ao Conselho de Pós-Graduação o trabalho em sua redação definitiva, a fim de que sejam feitos os encaminhamentos necessários à emissão do Diploma de Mestre em Computação Aplicada. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora e pela Coordenação do PPGCA.



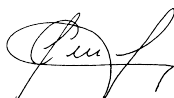
Prof. Dr. Willingthon Pavan - UPF
Presidente da Banca Examinadora (Orientador)



Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto - UPF
(Avaliador Interno)



Prof. Dr. Jose Mauricio Cunha Fernandes - EMBRAPA
(Avaliador Externo)



Prof. Dr. Carlos Amaral Hölbig - UPF
(Coordenador do PPGCA)

REPETIDOR PARA REDES LORAWAN COM ÊNFASE NA AGRICULTURA

RESUMO

Com o advento da Internet das Coisas (IoT), diversas tecnologias de comunicação surgiram para possibilitar a troca de informações entre dispositivos. A IoT está sendo usada no transporte, na indústria, na automação residencial, entre outras. Na agricultura, esse aporte também está presente devido a busca por melhor qualidade, maior produtividade e menor utilização de agroquímicos. Atualmente, segurança, instalação e confiabilidade estão se tornando mais importantes em comunicações sem fio, despontando, desta forma, as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Com grande potencial de aplicabilidade na agricultura, tecnologias LPWAN, como a LoRa e seu protocolo LoRaWAN estão sendo cada vez mais utilizadas. Alguns limites dessa tecnologia, como a não disponibilidade de saltos entre os dispositivos, desperta a necessidade de um dispositivo para suprir essa lacuna. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de baixo custo e transparente para redes LoRaWAN capaz de retransmitir mensagens por meio de vários saltos, assim, aumentando o alcance da rede. Três estudos de caso foram realizados com os dispositivos repetidores desenvolvidos. No primeiro estudo foi analisado o comportamento do dispositivo repetidor em relação a retransmissão de mensagens *downlink* e *uplink*. Devido a colisões e perda de mensagens um novo estudo foi realizado, no qual dois repetidores executaram funções distintas na retransmissão de mensagem, assim, obtendo uma menor taxa de perda de pacotes. O último estudo consistiu em uma rede com múltiplos saltos. Como resultado obteve-se um equipamento capaz de retransmitir mensagens *uplink* e *downlink* de forma transparente por meio de vários saltos.

Palavras-Chave: Internet das coisas, Saltos, LoRa, Coleta de dados, Aumento de alcance, Transparente.

LORAWAN REPEATER FOR AGRICULTURE

ABSTRACT

With the advent of the Internet of Things (IoT), several communication technologies have emerged to exchange information between devices. IoT is being used in transportation, industry, and home automation. In agriculture, this contribution is also present due to the search for better quality, higher productivity, and less use of agrochemicals. Security, installation, and reliability are becoming more important in wireless communications, thus emerging the LPWAN (Low Power Wide Area Network). With great potential for applicability in agriculture, LPWAN technologies, such as LoRa and its LoRaWAN protocol, are increasingly used. Some limits of this technology, such as the non-availability of hops between devices, awaken the need for a device to fill this lacuna. This paper presents the development of a low-cost and transparent device for LoRaWAN networks capable of relaying messages over multiple hops, thus increasing the range of the network. Three case studies were performed with the developed repeater devices. In the first study, the behavior of the repeater device with respect to retransmitting *downlink* and *uplink* messages was analyzed. Due to collisions and message loss, a new study was performed. Two repeaters performed different functions in a message relaying, thus leading to a more effective packet delivery rate. The last case study consisted of a network with multiple hops. After the case studies were performed, it was possible to relay messages transparently over multiple hops.

Keywords: IoT, Hops, LoRa, Data Collection, Range Enhancement, Transparent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Número de dispositivos IoT globalmente conectados e a distribuição dos dispositivos baseado no tipo de conexão.	19
Figura 2.	Alcance geográfico das tecnologias sem fio.	22
Figura 3.	Relação do consumo de energia e o alcance da comunicação em algumas tecnologias de rede sem fio. O tamanho o círculo representa a taxa de dado.	23
Figura 4.	A arquitetura das redes LPWANs é dividida em três camadas. A primeira camada, end-devices, são os dispositivos coletores de dados e atuadores. Na segunda camada, transmissão dos dados, encontram-se os gateways, na qual fazem a comunicação entre duas redes distintas. Por fim, na terceira camada, a nuvem, na qual é composta pelo tratamento e visualização dos dados para serem apresentados ao usuário. . . .	24
Figura 5.	Comparação das modulações de espectro estreito e espectro disperso. No espectro estreito acontece uma concentração de força no sinal em relação ao <i>Spread Waveform</i> , espectro disperso, na qual apresenta um espalhamento intencional.	26
Figura 6.	Visualização do sinal LoRa.	27
Figura 7.	Comparação de sinais LoRa com diferentes fatores de espalhamento em diferentes larguras de banda: (a) largura de banda 125KHz; (b) largura de banda 500 KHz. Fonte: Adaptado de: [19]	27
Figura 8.	Canais de utilização do Sigfox.	28
Figura 9.	Arquitetura da rede Sigfox. Na primeira camada estão presentes os end-nodes, dispositivos coletores e atuadores. Na camada seguinte encontram-se as estações base SigFox. A SigFox Cloud está presente na terceira camada. Por fim, a visualização e controle dos dados.	29
Figura 10.	Diferentes modos de operação de banda de frequência.	30
Figura 11.	Pilha de protocolos da tecnologia NB-IoT, na qual é dividida em plano de controle responsável pelas informações de sinalização e genericamente da rede, e em plano do usuário, que carrega os dados do usuário.	30
Figura 12.	Vantagens das tecnologias LoRa, Sigfox e NB-IoT em diferentes fatores da IoT.	32
Figura 13.	Disposição das camadas presentes na tecnologia LoRa	32

Figura 14.	Diferentes comportamentos de comunicação com a utilização das classes LoRaWAN.	33
Figura 15.	Fluxograma das mensagens enviadas, partindo de um dispositivo final até o servidor, em uma rede LoRaWAN	34
Figura 16.	Comunicação de um dispositivo final e servidor na ativação ABP.	35
Figura 17.	Comunicação de um dispositivo final e servidor na ativação OTAA.	36
Figura 18.	Canais de frequência AU915. Os 64 canais uplink com BW de 125 kHz, variando do DR0 ao DR5, em verde. Em azul são os 8 canais uplink com BW de 500 kHz, e em amarelo, são os 8 canais de downlink com BW de 500 kHz.	38
Figura 19.	Formato dos frames das mensagens LoRaWAN [35]	39
Figura 20.	Mini-estações meteorológicas com comunicação LoRa [1].	40
Figura 21.	Microcontrolador ATmega328p	40
Figura 22.	Módulo RMF95	41
Figura 23.	RTC DS3231	41
Figura 24.	Sensor de umidade relativa e temperatura.	42
Figura 25.	Exemplo da arquitetura de rede com a inserção do dispositivo <i>r-node</i> . As linhas verdes indicam que os dispositivos possuem alcance necessário entre o transmissor e o receptor utilizando a tecnologia LoRa para a transmissão. As linhas vermelhas mostram que não existe comunicação entre os dispositivos. A linha azul é a comunicação com a internet para envio das mensagens até o servidor.	45
Figura 26.	Arduino Nano.	46
Figura 27.	Conexões do hardware do dispositivo repetidor. Arduino Nano e módulo LoRa RMF95.	46
Figura 28.	Dispositivo repetidor desenvolvido utilizando Arduino Nano e Módulo RMF95.	47
Figura 29.	Gateway Sentries RG191.	47
Figura 30.	Diferença do plano de frequências entre US915 e AU915.	48
Figura 31.	Formato das mensagens com dados pré-fixados utilizando o Cayenne	50
Figura 32.	Exemplo de mensagem com envio de dois dados utilizando o Cayenne	50
Figura 33.	Parâmetros e configuração das frequências de envio e recebimento de mensagens <i>uplink</i> e <i>downlink</i> : (a) parâmetros necessários para o envio e recebimento; (b) configuração das frequências de <i>uplink</i> e <i>downlink</i>	52

Figura 34.	Fluxograma do funcionamento do <i>r-node</i> trabalhando com mensagens <i>uplink</i> e <i>downlink</i>	53
Figura 35.	Diagrama de transição de estados do dispositivo repetidor com <i>uplink</i> e <i>downlink</i>	54
Figura 36.	Código da função responsável pelo recebimento e envio de mensagens <i>downlink</i> e <i>uplink</i>	55
Figura 37.	Fluxograma do funcionamento dos <i>r-nodes</i> com os ciclos de trabalho diferentes, um responsável por mensagens <i>uplink</i> outro pelas mensagens <i>downlink</i>	56
Figura 38.	Painel de envio de mensagens <i>downlink</i> do <i>Network Server</i> , <i>The Things Stack</i> . No retângulo azul, está presente o campo para inserir o número da porta. No retângulo vermelho, o conteúdo da mensagem <i>downlink</i>	57
Figura 39.	Fluxograma do funcionamento dos dispositivos end-devices.	58
Figura 40.	Painel do <i>Network Server</i> , <i>The Things Stack</i> : (a) a valor dentro do contorno azul são as mensagens <i>uplink</i> recebidas e o vermelho as mensagens <i>downlink</i> de confirmação enviadas; (b) conteúdo da mensagem enviada e no retângulo azul, as mensagens <i>downlink</i> recebidas.	58
Figura 41.	<i>ScreenShot</i> da configuração dos canais de frequências do Gateway Laird 915.	59
Figura 42.	Alguns materiais e sua influência na propagação do sinal. Quanto mais forte for o material mais fraco é o sinal.	60
Figura 43.	Arquiteturas dos estudos com diferentes frequências para simular ausência de alcance e uso dos repetidores. As frequências alaranjadas são correspondentes às frequências de <i>downlink</i> e as escritas em cinza de <i>uplink</i> . Linhas vermelhas representam conexão inexistente e linhas verdes, conexões estáveis e de alta qualidade. O retângulo vermelho (A) representa uma rede LoRaWAN com um repetidor, o azul (B) é uma rede com dois repetidores, mas cada um responsável pelo envio de um tipo de mensagem (<i>uplink</i> ou <i>downlink</i>) e o retângulo verde (C) representa a rede com dois repetidores.	62
Figura 44.	Disposição dos dispositivos para a realização do primeiro estudo.	62
Figura 45.	Dispositivos de retransmissão de mensagens <i>uplink</i> e <i>downlink</i>	63
Figura 46.	Rede com dois dispositivos repetidores conectados sequencialmente.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Comparação de parâmetros da tecnologias Sigfox em relação as mensagens <i>uplink</i> e <i>downlink</i>	28
Tabela 2.	Comparação de características das tecnologias LoRa, Sigfox e NB-IoT.	31
Tabela 3.	Data Rates do plano AU-915 [32].	37

LISTA DE SIGLAS

3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
ABP – *Activation by Personalization*
ADR – *Adaptive Data Rate*
AES – *Advanced Encryption Standard*
BPSK – *Binary Phase Shift Keying*
BW – *Bandwidth*
CR – *Code Rate*
CSS – *Chirp Spread Spectrum*
DR – *Data Rate*
ED – *End-device*
GFSK – *Gaussian Frequency Shift Keying*
GSM – *Global System for Mobile Communications*
GW – *Gateway*
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IOT – *Internet of Things*
ISM – *Industrial, Scientific and Medical*
LORA – *Long Range*
LORAWAN – *Long Range Wide Area Network*
LPWAN – *Low Power Wide Area Network*
MAC – *Medium Access Control*
NB-IOT – *Narrowband-Internet of Things*
OTAA – *Over-the-Air Activation*
QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*
RSSI – *Received Signal Strength Indicator*
SC-FDMA – *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*
SF – *Spreading Factor*
TTN – *The Things Network*
WLAN – *Wireless Local Area Network*
WNAN – *Wireless Neighborhood Area Network*
WPAN – *Wireless Personal Area Network*

WWAN – *Wireless Wide Area Network*

WSN – *Wireless Sensor Network*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	REDE DE SENSOR SEM FIO - RSSF	21
2.1.1	Rede sem fio para aplicações IoT	22
2.2	TECNOLOGIAS LPWAN	23
2.2.1	Principais características	24
2.2.1.1	Longo Alcance	24
2.2.1.2	Baixo Consumo	25
2.2.1.3	Baixo Custo	25
2.2.1.4	Escalabilidade	25
2.2.2	Principais Tecnologias	25
2.2.2.1	LoRa	25
2.2.2.2	Sigfox	27
2.2.2.3	NB-IoT	28
2.2.3	Comparação entre as tecnologias LPWAN	31
2.3	PROTOCOLO LORAWAN	31
2.3.1	End-devices	33
2.3.2	Gateway e Servidor	34
2.3.3	Tipos de ativação	34
2.3.3.1	Ativação ABP	35
2.3.3.2	Ativação OTAA	36
2.3.4	<i>Data Rate e Adaptive Data Rate</i>	36
2.3.5	Parâmetros regionais	37
2.3.6	Formato dos frames	38
2.4	PROJETO MINI-ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	39
2.4.1	Hardware utilizado	39
2.4.1.1	Microcontrolador	40
2.4.1.2	Módulo LoRa	41
2.4.1.3	Controlador de tempo	41
2.4.1.4	Sensor de temperatura e Umidade Relativa	42

2.5	TRABALHOS RELACIONADOS	42
3	MATERIAL E MÉTODOS	45
3.1	HARDWARE	45
3.2	FERRAMENTAS DE SOFTWARE	48
3.2.1	Visual Studio Code com PlatformIO	48
3.2.2	The Things Network - TTN	49
3.2.3	Cayenne Low Power Payload - LPP	49
3.2.4	Biblioteca LoRaWAN	50
3.3	DISPOSITIVO <i>R-NODE</i>	51
3.3.1	<i>r-node</i> operando com <i>downlink</i> e <i>uplink</i>	52
3.3.2	<i>r-nodes</i> operando separadamente com um tipo de mensagem: <i>downlink</i> ou <i>uplink</i>	54
3.4	CONFIGURAÇÃO DOS END-DEVICES	55
3.5	CALCULO DA PERDA DE PACOTES	57
4	ANÁLISE E RESULTADOS	59
4.1	CONFIGURAÇÃO DA REDE	59
4.2	ESTUDOS COM <i>R-NODE</i>	61
4.2.1	<i>r-node</i> operando com <i>downlink</i> e <i>uplink</i>	61
4.2.2	Estudo com <i>r-nodes</i> operando separadamente com um tipo de mensagem: <i>downlink</i> ou <i>uplink</i>	63
4.2.3	Estudo com dois <i>r-nodes</i> sequencialmente	64
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	65
	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento acelerado do mercado IoT houve um aumento no desenvolvimento de novas tecnologias em áreas da microeletrônica, na comunicação sem fio e microprocessadores [1]. Em 2020, o número de conexões IoT globais excede o número de conexões tradicionais (smartphones, laptops e computadores) pela primeira vez [2]. No ano de 2021, até o mês de setembro (data da realização do estudo), 12,3 bilhões de dispositivos IoT estavam conectados. Até o final do ano de 2022 estima-se que serão 14,5 bilhões de dispositivos IoT ativos e espera-se que em 2025 esse número ultrapasse 27,1 bilhões (Figura 1)[3].

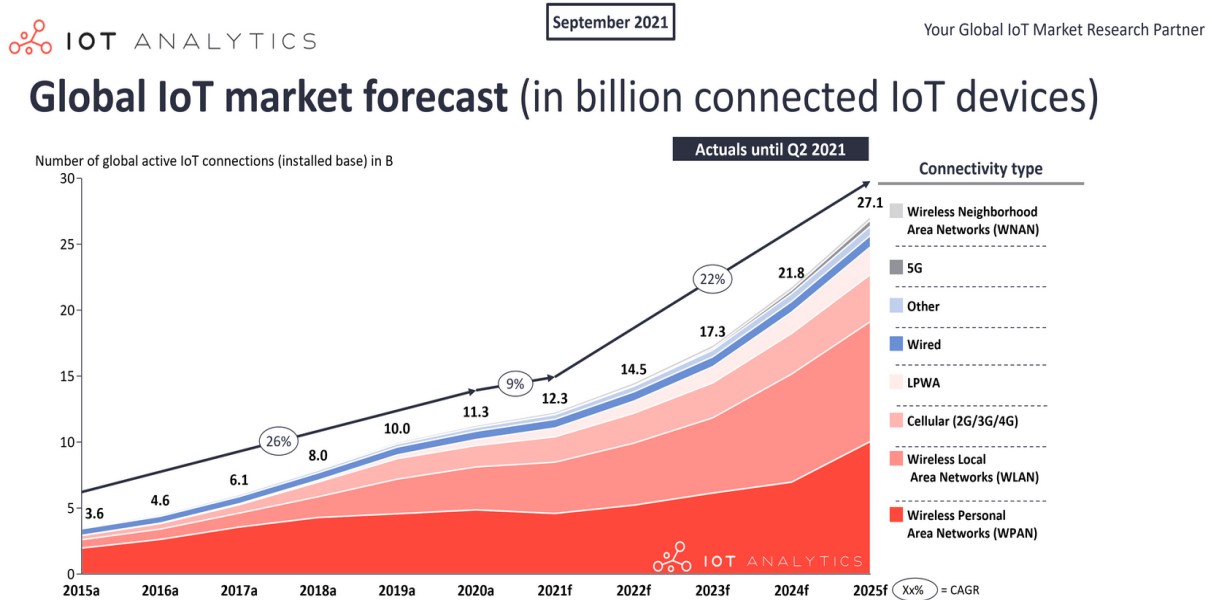


Figura 1. Número de dispositivos IoT globalmente conectados e a distribuição dos dispositivos baseado no tipo de conexão. [3].

Os avanços na agricultura de precisão com a utilização da Internet das Coisas (IoT) trouxe uma melhora na gestão geral da agricultura. A IoT possui diversas características, como escalabilidade e interoperabilidade, tornando-a uma parceira perfeita para a agricultura de precisão. Existem muitas tecnologias derivadas da IoT e todas trazem muitos benefícios, tanto na redução de riscos para a utilização da tecnologia, como no melhoramento de sistemas de inspeção/automação [4].

Recentemente, a tecnologia LPWAN ganhou popularidade devido às suas características de comunicação de baixo consumo e de longo alcance. Dispositivos com essa tecnologia podem realizar comunicação em distâncias de até 20 km. Em zonas urbanas, essa distância é reduzida pela presença de obstáculos físicos. Em alguns casos, em condições específicas, o alcance pode superar o limite da tecnologia chegando a centenas de quilômetros. Além disso, devido ao seu baixo consumo, a vida útil dos dispositivos podem

chegar a mais de 10 anos e os rádios de transmissão são de baixo custo de aquisição, em comparação com outras tecnologias de comunicação. Com essas características promissoras diversos estudos ([5],[6], [7], [6], [8], [9] e [10]) estão sendo realizados com as tecnologias LPWAN, podendo ser utilizados *indoor* [11], em um ambiente industrial e *outdoor* [12], em uma aplicação na agricultura. A LPWAN é adequada para aplicações IoT que necessitam enviar poucos dados a longas distâncias [5].

A tecnologia de comunicação de longa distância, LoRa, é utilizada na coleta de dados para agricultura, pois a aquisição de dados meteorológicos mais pontuais são condições primárias para muitos sistemas de auxílio à tomada de decisão. Porém, o protocolo de comunicação utilizado pelo LoRa, LoRaWAN, é limitado em relação a sua organização, pois seus dispositivos são organizados na topologia de rede estrela, no qual, um elemento da rede, Gateway, é centralizado. A função do Gateway é de receber informações de outros dispositivos (End-device) de forma direta. Inúmeras razões de falta de conectividade entre o Gateway e end-devices podem ser encontrados em áreas agrícolas, como: a topologia do terreno; acesso à Internet limitado ao escritório da fazenda; e isolamento dos end-devices devido a organização dos mesmo em relação ao gateway. Desta forma, alguns dispositivos podem ficar isolados (perder conexão com o gateway) em relação a outros dispositivos. Para se alcançar maiores distâncias de transmissão o aumento nos níveis de potência acarreta em um aumento no consumo de energia dos dispositivos finais reduzindo a vida útil da bateria.

No projeto de [1] e posteriormente no trabalho de [13], foi desenvolvido uma rede LoRa de mini-estações meteorológicas para coleta de dados para a agricultura, visando baixo custo e baixo consumo de energia. As mini-estações utilizam um microcontrolador Atmega328p, rádio LoRa e sensores para leitura de dados. Os desafios de comunicação citados, isolamento dos dispositivos e falta de comunicação com o Gateway, foram encontrados após alguns testes realizados.

Visando suprir essa lacuna, o objetivo deste trabalho é desenvolver um repetidor de mensagens LoRaWAN de forma transparente, não interferindo nas mensagens entre end-device e gateway. Além disso, o dispositivo deve realizar a retransmissão tanto das mensagens *uplink* como as de *downlink* transmitindo as mensagens com diversos saltos para aumentar o alcance da rede, e de baixo custo econômico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Internet das Coisas (IoT) se refere à interconexão e troca de dados entre dispositivos/sensores. Hoje, com o desenvolvimento intensivo da tecnologia IoT, aplicações práticas podem ser implantadas em várias áreas, incluindo segurança, rastreamento de ativos, agricultura, cidades inteligentes, casas inteligentes, entre outros. Os dispositivos IoT são elementos dentro de uma rede que requer um baixo consumo de energia ou uma vida longa do ciclo da bateria, grandes distâncias na comunicação e baixo custo. Várias tecnologias fabricadas atualmente fazem uso de rede sem fio, com grande capacidade de transferência de dados, algumas de longo alcance e consumo de energia elevado, por exemplo, IEEE 802.11 (a,b,g e n), WLAN (*Wireless Local Area Network*) e as redes de transmissão de dados móveis 3G e 4G. Portanto, devido a necessidade de tecnologias de comunicação sem fio, com as características de baixo consumo de energia e longo alcance, levou o surgimento de uma nova tecnologia, *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) [5, 1].

2.1 REDE DE SENSOR SEM FIO - RSSF

Redes de Sensor Sem Fio (RSSF), ou *Wireless Sensor Network* (WSN), começaram a ganhar popularidade nos últimos anos devido, principalmente, pela proliferação das tecnologias nos Sistemas Microeletromecânicos, na qual contribuíram para o desenvolvimento de sensores. Os dispositivos equipados com sensores podem detectar, medir e coletar diversas informações do ambiente. Cada nodo é composto por um microprocessador e um módulo de comunicação sem fio, além dos sensores para coleta de informações. Os nodos podem ser distribuídos e organizados em diferentes topologias de rede, tornando assim, um atrativo em locais de difícil acesso onde o uso de uma rede cabeada é inviável [14, 1].

Os desafios para o desenvolvimento de dispositivos com sensores dependem da aplicação em que serão inseridos, assim, podem ser: fonte de energia limitada, baixa capacidade de armazenamento e de processamento e custo dos dispositivos. Os dispositivos normalmente são alimentados por baterias, sendo a limitação mais crítica, pois os dispositivos precisam se adequar dinamicamente a rede. Porém, se os dispositivos possuírem um gerenciamento eficiente de energia, configurando para baixo consumo de energia, pode-se aumentar consideravelmente a vida útil [14, 1].

2.1.1 Rede sem fio para aplicações IoT

Com o surgimento de novas tecnologias, se fez necessário o desenvolvimento de novas formas de comunicação sem fio. Os meios de comunicação, inicialmente, foram desenvolvidos para altas taxas de transferências de dados, alta complexidade, alto custo de implementação e consumo de energia elevado. Novos padrões de comunicação vêm sendo desenvolvidos para que seja possível utilizar as aplicações que não dispõem desses recursos [1, 6].

As redes sem fio abrangem diferentes faixas geográficas, como pode ser observado na Figura 2. *Wireless Personal Area Networks* (WPANs) está subdividida em uma rede de proximidade baseada no RFID (*Radio Frequency Identification*) e NFC (*Near Field Communication*).

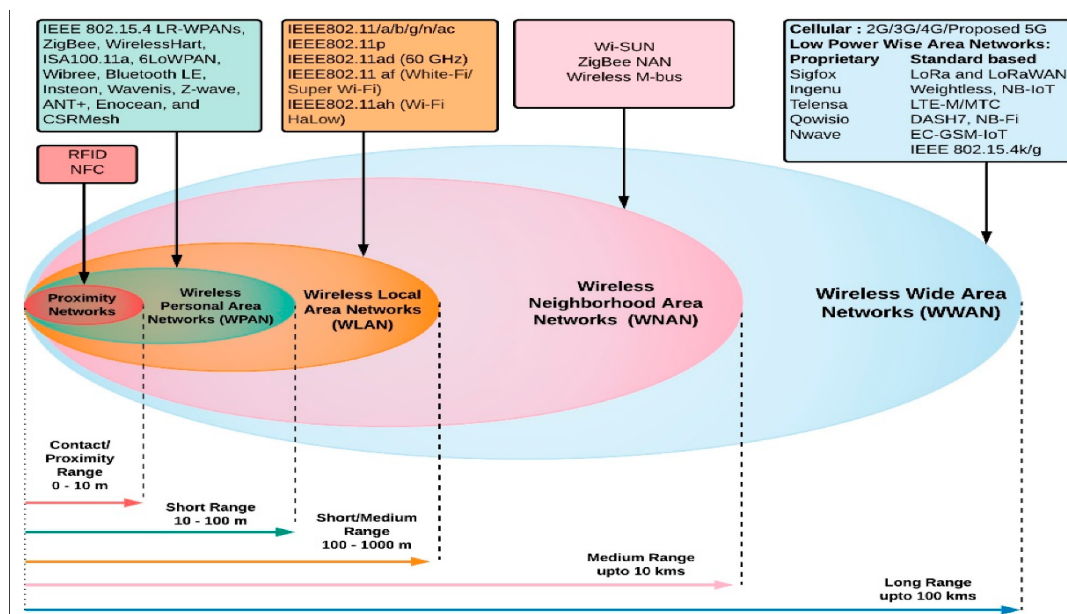


Figura 2. Alcance geográfico das tecnologias sem fio [6].

Wireless Personal Area Network (WPAN) são redes de curto alcance (de 10 a 100 metros), com pouco ou nenhuma infraestrutura. Muitas das WPANs são projetadas para baixa taxa de dados, eficiência energética e curta distância e com baixo custo de produção. Tecnologias como Bluetooth, ZigBee, WirelessHart, ISA100.11a e 6LoWPAN. fazem parte desse grupo [1, 6].

Wireless Local Area Network (WLAN) é destinada para tecnologias que possuem alcance entre 100 e 300 metros. Desenvolvidas para alta velocidade na troca de informações entre os dispositivos. Aqui se enquadram as redes Wi-Fi [1, 6].

Wireless Neighborhood Area Network (WNAN) possui o alcance máximo de 10 Kms. São tecnologias para aplicações de distribuição local sem fio, com uma área de serviço menor do que a metropolitana, mas maior do que as redes de área local. Wi-SUN,

ZigBee NAN e Wireless M-bus são algumas tecnologias que se adequam a esse grupo [6].

Wireless Wide Area Networks (WWANs) projetadas para atender áreas de até 100 Kms. WWANs podem ser classificadas em celulares e LPWANs. As redes de celular, 3G e 4G, possuem alta velocidade nas transferências de dados por algumas dezenas de quilômetros. As LPWANs são redes de longa distância com baixo consumo de energia. Estima-se que um quarto dos dispositivos IoT/ M2M conectados à Internet utilizam tecnologias LPWAN [6].

2.2 TECNOLOGIAS LPWAN

Ao contrário das tecnologias 3G/4G ou Wi-Fi, as redes LPWAN representam uma nova tendência na evolução de comunicações IoT. Deve-se a isso, o fato de não concentrar suas características em permitir altas taxas de dados por dispositivo ou em minimizar a latência. Em vez disso, as principais métricas de desempenho utilizados para LPWAN são escalabilidade, cobertura e eficiência energética. Diversas comunicações de longo alcance chegaram ao mercado, sendo que as mais utilizadas são LoRa, NB-IoT e SigFox [8]. Na Figura 3 é apresentada uma abordagem do consumo em relação ao alcance de algumas tecnologias de comunicação sem fio.

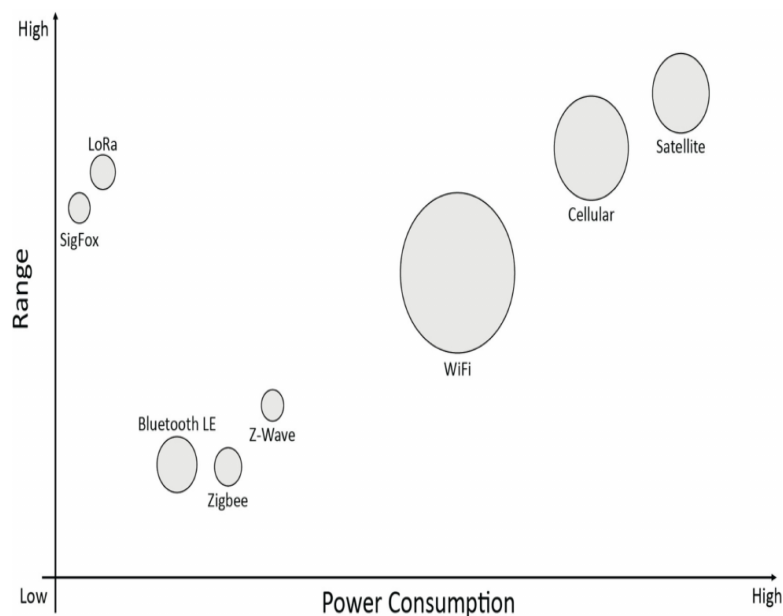


Figura 3. Relação do consumo de energia e o alcance da comunicação em algumas tecnologias de rede sem fio. O tamanho o círculo representa a taxa de dado [15].

Nas redes LPWAN, em sua camada física, estão presentes os concentradores denominados gateways e por dispositivos coletores ou atuadores denominados end-devices. As mensagens podem ser enviadas dos end-devices para o gateway, chamadas de *uplink*,

e do gateway para os end-devices de *downlink*. Nas camadas superiores estão presentes as aplicações IoT e protocolos que servem de gerenciamento da rede (Figura 4) [8].

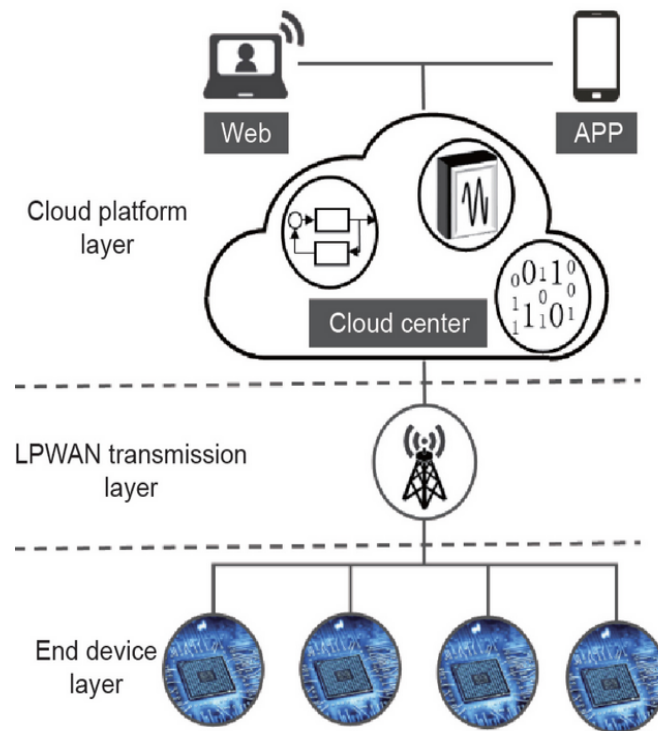


Figura 4. A arquitetura das redes LPWANs é dividida em três camadas. A primeira camada, end-devices, são os dispositivos coletores de dados e atuadores. Na segunda camada, transmissão dos dados, encontram-se os gateways, na qual fazem a comunicação entre duas redes distintas. Por fim, na terceira camada, a nuvem, na qual é composta pelo tratamento e visualização dos dados para serem apresentados ao usuário [8].

2.2.1 Principais características

Algumas das características cruciais das redes LPWAN são o longo alcance, baixo consumo de energia, baixo custo e escalabilidade. Essas características são abordadas brevemente nos itens a seguir [6, 5].

2.2.1.1 Longo Alcance

As tecnologias LPWAN são desenvolvidas para que seus dispositivos alcancem vários quilômetros de cobertura e com a propagação de sinal em locais internos de difícil acesso. Geralmente, a LPWAN fornece comunicação de longo alcance de 10 a 20 km em zonas rurais/desérticas, entre 1 a 5 km em zonas urbanas. Devido às técnicas de modulação de sinal utilizadas pelas tecnologias LPWAN, a sensibilidade típica dos receptores chegam a -130 dBm [7, 5].

2.2.1.2 Baixo Consumo

Para que os dispositivos end-devices sejam utilizados em redes IoT, alimentados por bateria, a operação de baixo consumo de energia é um requisito fundamental. Com eficiência energética de 10 anos ou mais, os dispositivos podem ser alimentados com baterias AA ou pilhas tipo moedas, assim, reduzindo o custo de manutenção [7].

2.2.1.3 Baixo Custo

As redes LPWAN são capacitadas para suportar a conexão de um grande número de dispositivos finais (end-devices), com baixo custo de aquisição [5], possibilitando grande vantagem comercial. Essa acessibilidade permite que as tecnologias LPWAN concorram com outras redes já bem estabelecidas no mercado [7].

2.2.1.4 Escalabilidade

As redes LPWAN precisam oferecer suporte a um grande número de dispositivos conectados simultaneamente com baixa taxa de dados, sendo um dos principais requisitos para essas tecnologias. Escalabilidade refere-se à capacidade de aumento, inserção de novos dispositivos na rede, e da densidade de dispositivos conectados sem comprometer a qualidade e o fornecimento de serviços existentes [7, 6].

2.2.2 Principais Tecnologias

Diversas tecnologias LPWAN estão sendo utilizadas pelo mercado, mas três delas lideram atualmente: Sigfox, LoRa, e NB-IoT. São tecnologias que utilizam diferentes técnicas e apresentam vantagens e desvantagens dependendo da aplicação. Nas próximas seções são apresentadas as principais características de cada tecnologia citada.

2.2.2.1 LoRa

LoRa, que significa *Long Range*, é uma marca registrada pela *Semtech Corporation*¹. LoRa é referenciada comumente a duas camadas distintas, a camada física, na qual utiliza a técnica de modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), de comunicação bidirecional. Essa técnica realiza o espalhamento de um sinal de entrada de banda estreita por uma largura de banda mais ampla, diferentemente da modulação de banda estreita, na

¹<https://www.semtech.com/>

qual acontece um sobressalto do sinal em formato de pico (Figura 5). A outra camada é do protocolo MAC, onde se encontra o protocolo LoRaWAN, responsável por utilizar a camada física [16, 7].

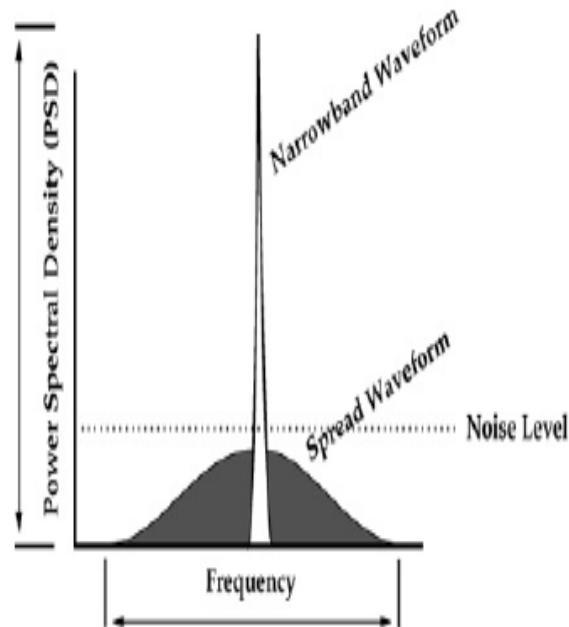


Figura 5. Comparação das modulações de espectro estreito e espectro disperso. No espectro estreito acontece uma concentração de força no sinal em relação ao *Spread Waveform*, espectro disperso, na qual apresenta um espalhamento intencional [17].

Sua operação varia de acordo com a região de utilização, podendo ser 433MHz, 868MHz e 915MHz de bandas ISM não licenciadas e gratuitas. São bandas conhecidas para o uso industrial, científico e médico (ISM), e reservadas internacionalmente para este fim. O sinal LoRa gerado pela modulação consiste em pulsos de frequências *chirps* que variam a frequência linearmente ao longo do tempo. As rampas geradas pelos pulsos variam entre uma frequência mínima e uma frequência máxima, chamadas de *up-chirp* e as rampas que partem da frequência máxima para mínima de *down-chirp*. A modulação dos *chirps* ocorre devido a variações de descontinuidade dos pulsos (Figura 6) [5].

Diversos parâmetros estão presentes para a personalização da modulação LoRa, *Bandwidth (BW)*, *Spreading Factor (SF)*, ou fator de espalhamento, e *Code Rate (CR)*. O SF codifica o pulso entre 7 e 12 bits. É um fator que impacta diretamente na comunicação: quanto mais alto o fator de espalhamento mais longo será o seu alcance, menos íngremes serão os *chirps* e mais baixa será a taxa de dados [5].

A largura de banda (BW), é outro fator importante. Seus valores são 125, 250 ou 500 KHz. Esse parâmetro indica o intervalo de tempo de variação dos *chirps*. Quando é atingida a frequência da banda, a frequência volta ao início e o aumento começa novamente a partir da frequência mínima, como pode ser visto na Figura 7 [5].

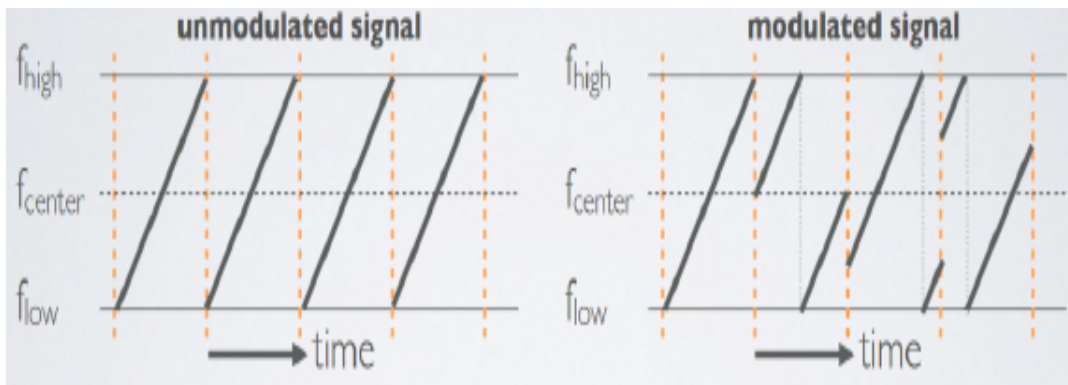


Figura 6. Visualização do sinal LoRa [18].

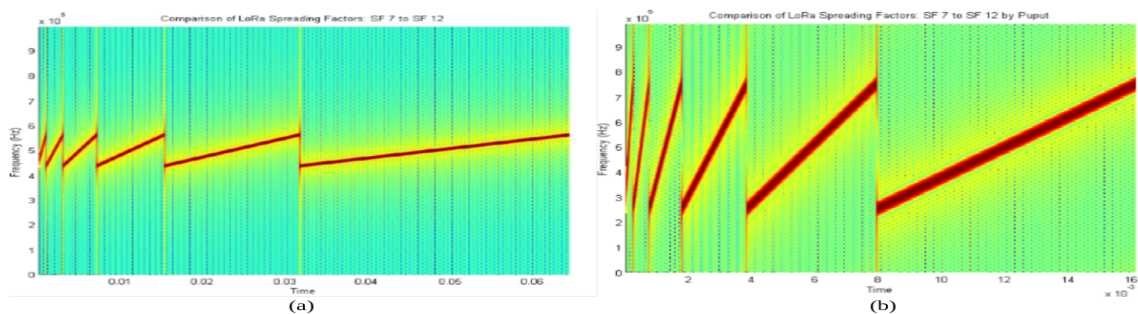


Figura 7. Comparação de sinais LoRa com diferentes fatores de espalhamento e em diferentes larguras de banda: (a) largura de banda 125KHz; (b) largura de banda 500 KHz. Fonte: [19]

A largura de banda e o fator de espalhamento controlam os parâmetros físicos da modulação. O *Code Rate*, Taxa de Codificação, controla essencialmente a quantidade que deve ser corrigida em relação ao erro de encaminhamento da mensagem, *Forward Error Correction*, no qual é adicionado aos dados a serem enviados.

2.2.2.2 Sigfox

Sigfox é uma rede LPWAN que oferece conectividade IoT *end-to-end*. Foi uma das primeiras tecnologias a ser apresentada ao mercado. Fundada em 2009, com abordagem baseada na topologia de rede das redes de celulares, mas com baixa largura de banda e baixa taxa de transferência de dados [5]. Também, foi uma das primeiras empresas a apresentar um produto para o mercado IoT [20].

A tecnologia utiliza a modulação de rádio de banda ultra estreita para melhorar a robustez e alcance do sinal. A transmissão das mensagens acontecem em bandas de ISM não licenciadas. Na Europa, a faixa de operação está situada entre 868,180 MHz e 868,220 MHz. É dividida em 400 canais de 100 Hz, sendo os canais 181 ao 219 não utilizados, como pode ser visto na Figura 8 [20].

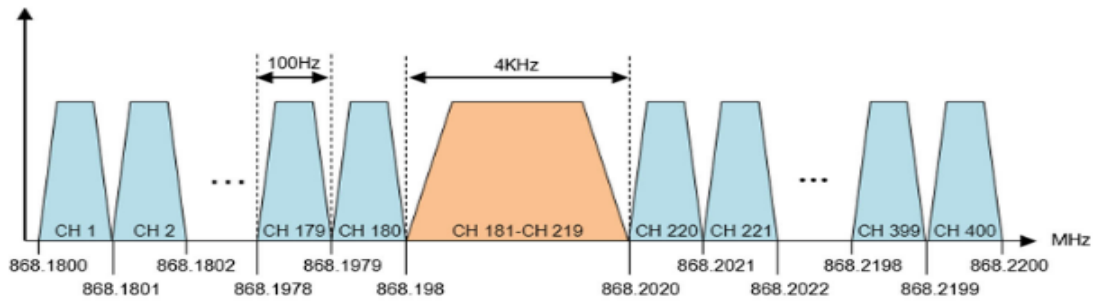


Figura 8. Canais de utilização do Sigfox [20]

O mecanismo de transmissão utiliza redundância, assim, os dados são enviados 3 vezes em diferentes canais e em diferentes intervalos de tempo. Esta redundância permite que a comunicação seja mais robusta. Inicialmente, Sigfox era unidirecional, na qual apenas mensagens *uplink* eram transmitidas. A comunicação *downlink*, bidirecional, foi adicionada posteriormente. Cada end-device pode enviar 140 mensagens por dia com no máximo 12 bytes e receber 4 mensagens *downlink* por dia com 8 bytes de tamanho máximo, com isso, não é permitido a confirmação de dados recebidos. Essa limitação é suprida pela redundância do envio de pacotes, assim, aumentando sua confiabilidade [20, 21]. Outras características de comunicação da tecnologia Sigfox são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação de parâmetros da tecnologias Sigfox em relação as mensagens *uplink* e *downlink* [20].

Parâmetro	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
Modulação	BPSK	GFSK
Limite de envio de dados (bytes)	12	8
Largura de Banda (Hz)	100	600
Limite de taxa de dados (bps)	100	500
Limite de envio diário	140	4

Uma rede Sigfox (Figura 9) possui um gateway altamente sensível, pois pode fazer a demodulação de sinais que estão próximos do limite de nível de ruído. As mensagens recebidas dos Sigfox node são enviadas para o Sigfox Cloud por meio do protocolo IP. Sua arquitetura de rede é semelhante a da LoRaWAN. No Brasil, a Sigfox é operada pelo Grupo WND, estando presente para mais de 106 milhões de pessoas no território nacional [21, 22].

2.2.2.3 NB-IoT

NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) é uma tecnologia IoT especificada na versão 13 do 3GPP em 2016. 3GPP é um projeto que reúne Organizações de Desenvolvimento de Padrões internacionais de todo o mundo. NB-IoT pode coexistir com as bandas GSM e LTE fazendo parte de frequências licenciadas (700 MHz, 800 MHz e 900 MHz). Ela foi desenvolvida para que fosse mais simples possível, assim, reduzindo os custos do dispo-

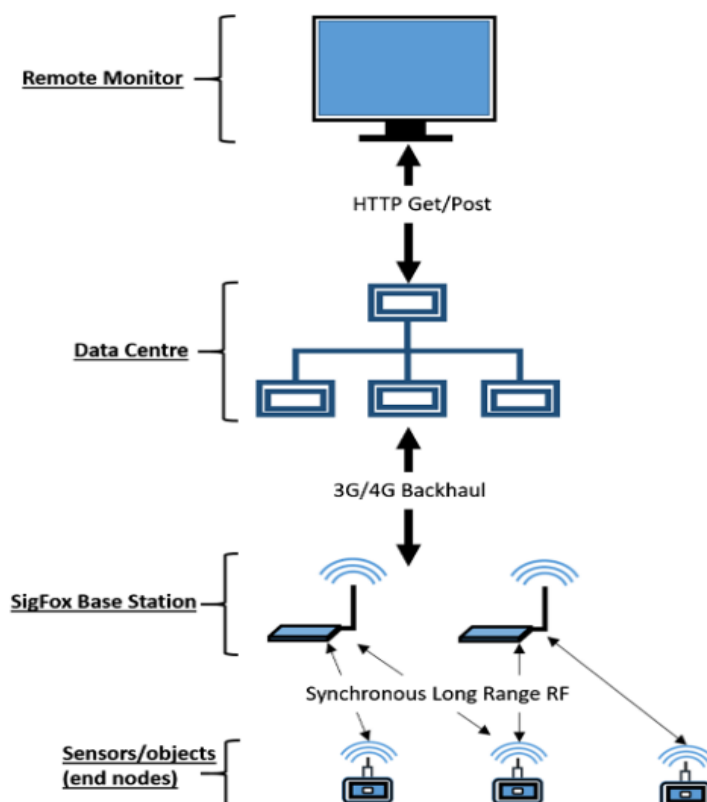


Figura 9. Arquitetura da rede Sigfox. Na primeira camada estão presentes os end-nodes, dispositivos coletores e atuadores. Na camada seguinte encontram-se as estações base SigFox. A SigFox Cloud está presente na terceira camada. Por fim, a visualização e controle dos dados [20].

sitivo e minimizando o consumo de energia. Devido a isso, diversos recursos LTE como, medições da qualidade do canal, agregação da operadora e conectividade dupla, foram removidos [23].

A modulação empregada pelo NB-IoT é a do Chaveamento de Deslocamento de Fase em Quadratura, do inglês *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), na qual utiliza uma largura de banda de 200KHz. Três implantações de banda de frequência estão disponíveis (Figura 10): banda autônoma (*stand-alone*), banda de guarda (*guard band*) e banda interna (*in-band*). Na operação *stand-alone*, o NB-IoT pode ser usado para substituir uma ou mais operadoras GSM. Na banda de guarda, a portadora NB-IoT é alocada entre duas portadoras LTE. Por fim, banda interna, são utilizados blocos de recursos dentro de uma portadora LTE normal[24].

Para envio de mensagens, cada portadora de banda possui um total de 12 subportadoras de 15 kHz para *downlink*, que utiliza da multiplexagem, Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). As mensagens *uplink* possuem a alternativa de 3,75 e 15 KHz utilizando *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*(SC-FDMA), Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência de Portadora Única [23].

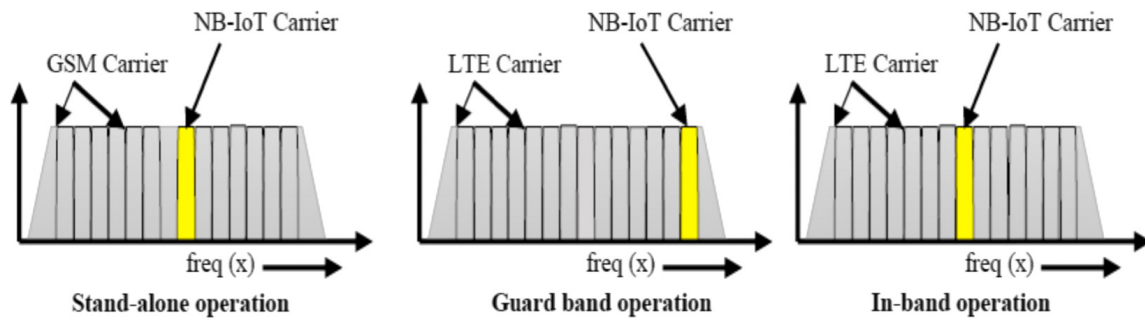


Figura 10. Diferentes modos de operação de banda de frequência [23].

O protocolo de comunicação utilizado pelo NB-IoT é baseado no protocolo LTE. Uma característica do protocolo da NB-IoT é que ele reduz ao mínimo as funcionalidades do protocolo LTE e as aprimora conforme a necessidade para as aplicações IoT. A pilha de protocolos LTE (Figura 11) é dividida em plano de controle e plano de usuário, na qual o plano de controle é responsável pelas informações de sinalização e gerenciamento da rede. O plano de usuário carrega dados do usuário. O *User Equipment* (UE), Equipamento do Usuário, é o dispositivo equivalente ao end-device e eNodeB (eNB) é o nome dado aos concentradores, equivalente aos gateways da rede LoRa. [23, 10].

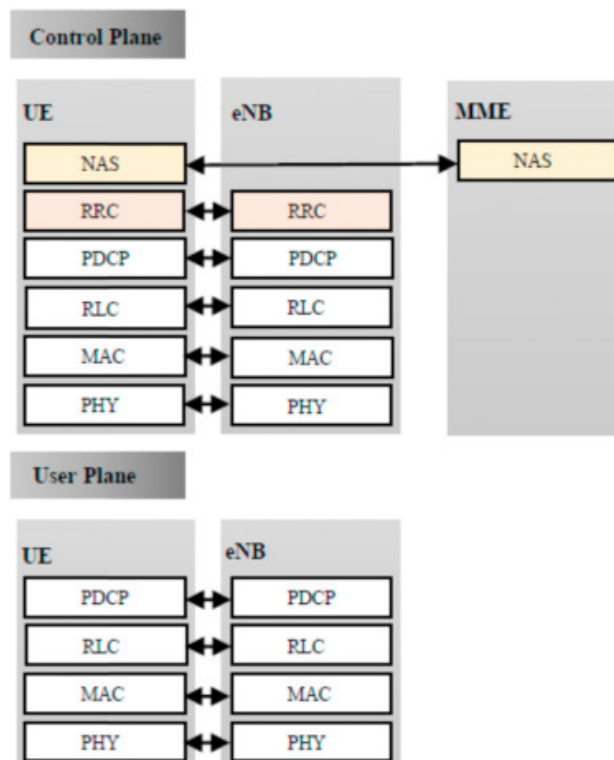


Figura 11. Pilha de protocolos da tecnologia NB-IoT, na qual é dividida em plano de controle responsável pelas informações de sinalização e genericamente da rede, e em plano do usuário, que carrega os dados do usuário [23].

É possível conectar 100k dispositivos finais em cada receptor. A taxa de dados é limitada em 200 kbps para *downlink* e 20 kbps para *uplink*. O tamanho máximo para cada

mensagem é de 1600 bytes. A vida útil da bateria pode chegar a 10 anos com uma taxa de transmissão de 200 bytes em média por dia [5, 10].

2.2.3 Comparação entre as tecnologias LPWAN

O comparativo foi realizado abordando características das tecnologias LoRa, Sigfox e NB-IoT. Com isso, na Tabela 2, podem ser observadas algumas das propriedades de cada tecnologia.

Tabela 2. Comparação de características das tecnologias LoRa, Sigfox e NB-IoT.

	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Modulação	CSS	BPSK/GFSK	QPSK
Frequência	Não licenciada (ISM)	Não licenciada (ISM)	Licenciada (LTE)
Largura de banda	125/250/500 KHz	100 Hz	200 KHz
Bidirecional	Sim	Limitado	Sim
Payload máximo (bytes)	243	12 (UL) e 8 (DL)	1600
Autenticação e criptografia	Sim (AES 128b)	Não suportado	Sim (LTE)
Alcance máximo (Km)	5 Urbano, 20 Rural	10 Urbano, 40 Rural	1 Urbano, 10 Rural
Mensagens por dia	Ilimitado	40 (UL), 4 (DL)	Ilimitado
Protocolo aberto	Sim	Não	Não
Taxa máxima de dados	50 kbps	100 bps	200 kbps

LoRa e Sigfox possuem um consumo de energia menor em relação a NB-IoT, além de possuir maior flexibilidade. NB-IoT possui a característica mais voltada para a qualidade do serviço. Cada tecnologia tem sua aplicação no mercado de IoT. Na Figura 12 é apresentado algumas características das três tecnologias por meio de um gráfico de Granovetter. Pode-se observar que a NB-IoT possui a vantagem de oferecer uma alta escalabilidade e qualidade de serviço. Por outro lado, LoRa e Sigfox possuem características semelhantes e apresentam maior economia de energia e flexibilidade em relação aos ambientes de utilização dessas tecnologias.

2.3 PROTOCOLO LORAWAN

LoRaWAN, é um protocolo MAC criado para utilizar a camada física LoRa. Vários recursos importantes de uma rede sem fio são encontrados no protocolo LoRaWAN, como criptografia, otimização de dados e qualidade de serviço [25]. É um protocolo de padrão aberto que faz uso dos recursos do módulo LoRa [26]. As redes LoRaWAN são geralmente representadas em uma topologia de rede estrela, onde os *gateways* se localizam centralizados, recebendo os dados dos *end-devices*. Essa arquitetura de rede oferece um melhor desempenho na comunicação a longa distâncias e um boa vida útil das baterias [27]. Para

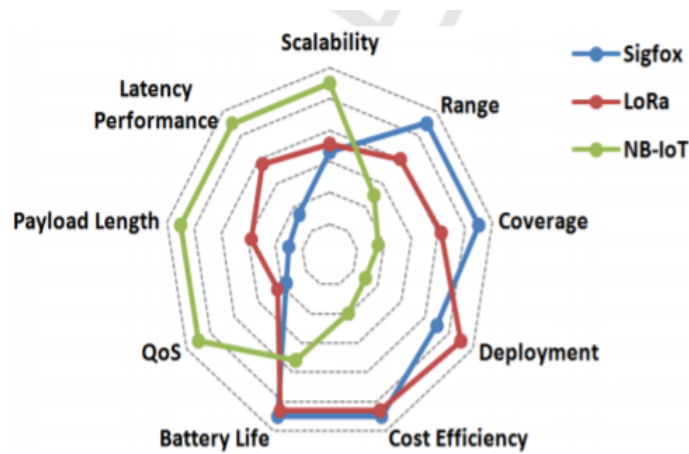


Figura 12. Vantagens das tecnologias LoRa, Sigfox e NB-IoT em fatores da IoT LoRaWAN [5].

tornar possível a comunicação em uma rede LoRaWAN são necessários três elementos fundamentais: os end-devices, o gateway e o servidor.

Na Figura 13 é possível analisar as camadas que estão presentes na tecnologia LoRa. Na primeira camada está presente a faixa de banda de frequências ISM para operação, na qual depende da região em que a tecnologia será implementada. A camada de modulação é a camada em que acontece a linearidade dos pulsos. A camada MAC é o local em que são definidos quais serão as características do dispositivo, Classe A, Classe B ou Classe C. As Classes definem como será o comportamento do end-device na rede LoRaWAN. Na última camada é a função ou aplicação do dispositivo.

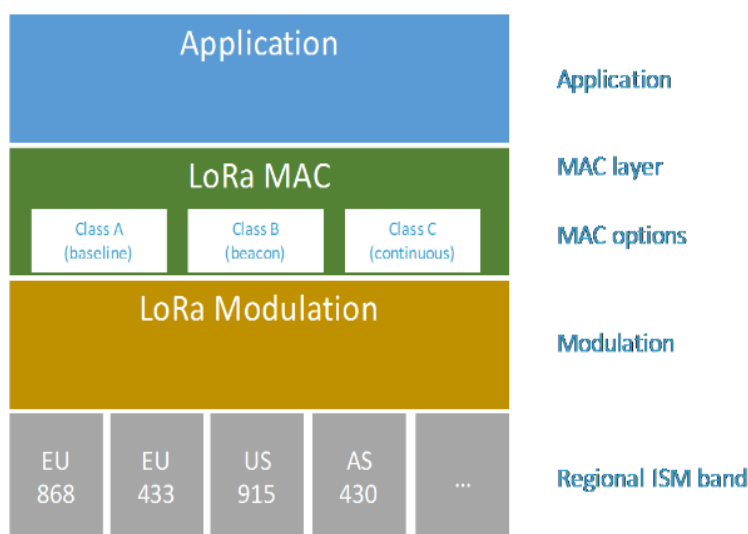


Figura 13. Disposição das camadas presentes na tecnologia LoRa [27].

2.3.1 End-devices

End-devices são dispositivos presentes na rede LoRaWAN que visam o baixo consumo de energia e que podem funcionar como coletores de dados ou atuadores. Os end-devices se comunicam com os *gateways*, utilizando o protocolo LoRaWAN. O LoRa oferece três tipos de dispositivos finais para atender às diversas necessidades de aplicações (Figura 14):

- Classe A: dispositivos conhecidos como "folha", são dispositivos que estão nas extremidades da rede, que possuem uma comunicação bi-direcional com um *gateway*, onde as mensagens de *uplink* (mensagens da aplicação para o servidor) podem ser enviadas a qualquer momento para o servidor. Após o envio da mensagem *uplink*, o dispositivo abre duas janelas de recepção em horários definidos. Caso o servidor não responda em nenhuma dessas janelas de recepção, ficará para a próxima a transmissão *uplink* do *end-node*. O servidor pode usar uma das duas janelas para enviar informações para os dispositivos [25, 26].
- Classe B: dispositivos finais, bi-direcionais, que além de possuírem janelas de recebimento aleatórios, como da Classe A, possuem *slots* de recebimento agendados de mensagens de *downlink* (mensagem da aplicação para o dispositivo) do servidor [26].
- Classe C: end-devices bi-direcionais que possuem suas janelas de recebimento abertas em todo o tempo do ciclo de trabalho do end-device, exceto no momento em que é realizado a transmissão. A janela RX2 permanece continuamente em modo de recepção.

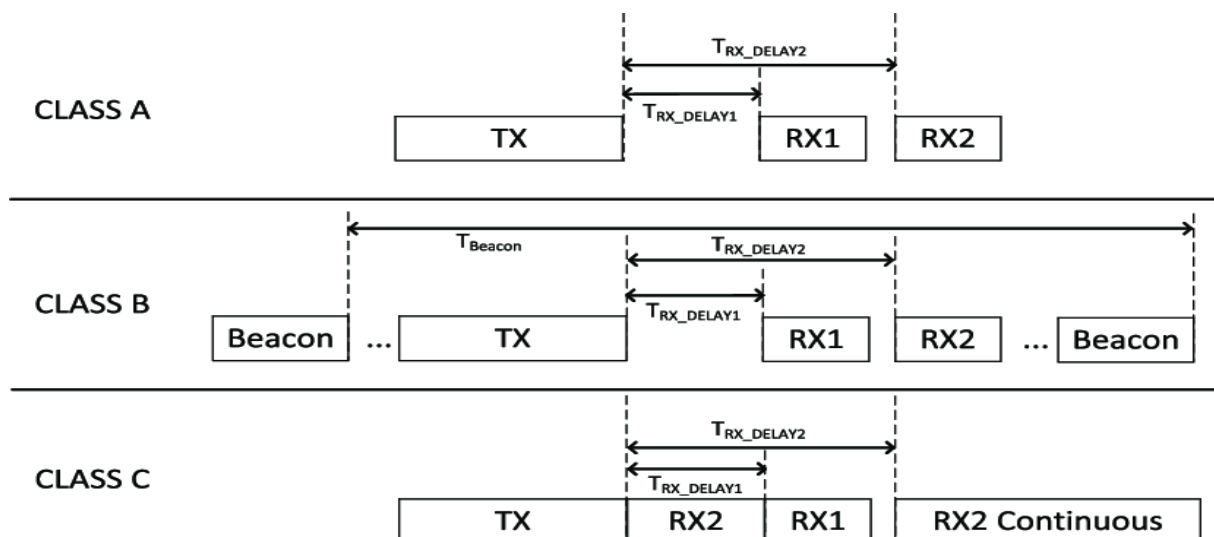


Figura 14. Diferentes comportamentos de comunicação com a utilização das classes LoRaWAN [28].

2.3.2 Gateway e Servidor

Por definição os gateways fazem a comunicação entre duas redes distintas, para que seja possível trocar informações entre as duas extremidades da rede (servidor e end-device). Na rede LoRa os dispositivos finais se comunicam com os gateways, utilizando o protocolo LoRaWAN, sendo que estes se conectam com o servidor a partir de redes de alta largura de banda, como redes sem fio (4G ou 5G) ou a cabo. São chamados também de concentradores, pois recebem todas as informações dos dispositivos finais e transmitem para o servidor [29].

Os servidores (*Network Server*), recebem os dados dos gateways, onde contêm as aplicações que realizam o tratamento dos dados. Os servidores podem ser privados ou públicos, como é o caso do The Things Network, onde é possível visualizar os dados dos end-devices, fazendo o registro desses dispositivos.

Os servidores LoRaWAN estão na última camada do destino das mensagens. É nessa camada em que são implementados algoritmos para tratamento e visualização das mensagens recebidas. Na Figura 15 é possível verificar a estrutura de transmissão dos dados, na qual os end-devices fazem a coleta de dados específicos, como temperatura e umidade relativa, por exemplo, e transmitem esses dados utilizando o protocolo LoRaWAN. Esses dados enviados são recebidos por um Gateway que após ter recebido os pacotes os envia para o servidor, podendo ser, por meio de uma comunicação Wi-Fi.

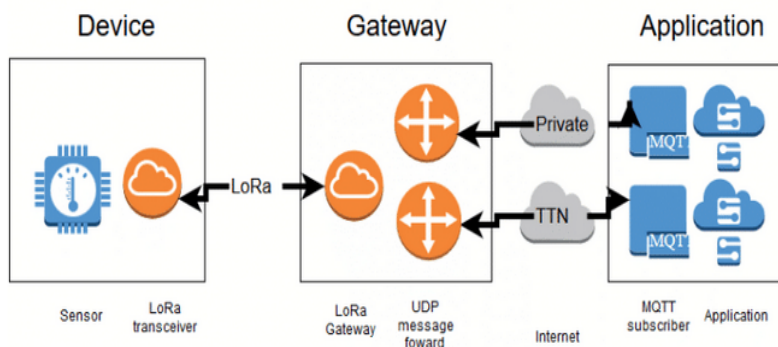


Figura 15. Fluxograma das mensagens enviadas, partindo de um dispositivo final até o servidor, em uma rede LoRaWAN [30].

2.3.3 Tipos de ativação

Para um dispositivo final participar de uma rede LoRaWAN ele precisa ser ativado. A ativação está relacionada ao modo em que os dispositivos são integrados na rede. Estão disponíveis duas maneiras de ativação: *Activation by Personalization (ABP)*, Ativação por Personalização e *Over-the-Air Activation (OTAA)*, Ativação pelo Ar.

Para que ocorra o processo de ativação do dispositivo final são necessárias as seguintes informações [5]:

- Endereço do dispositivo final (DevAddr): É um identificador de 32 bits. Sete desses bits são usados como identificador de rede e os 25 bits restantes são o endereço de rede do dispositivo final.
- Identificador da aplicação (AppEUI): Um ID global da aplicação no padrão IEEE EUI64, que identifica o proprietário do dispositivo final.
- Chave de sessão de rede (NwkSKey): É uma chave para verificar a integridade da mensagem entre o dispositivo final e o servidor de rede e garantir a confiabilidade dos dados.
- Chave de sessão da aplicação (AppSKey): Uma chave para criptografar e descriptografar os dados entre servidor e dispositivo final.

2.3.3.1 Ativação ABP

Neste tipo de ativação, o dispositivo final possui as chaves Network Session Key (NwkSKey) e Application Session Key (AppSKey), e do endereço Device Address (DevAddr), já definidos na hora em que o código é gravado no dispositivo, permanecendo as mesmas até a fim da vida útil do dispositivo (Figura 16) [26, 5] .

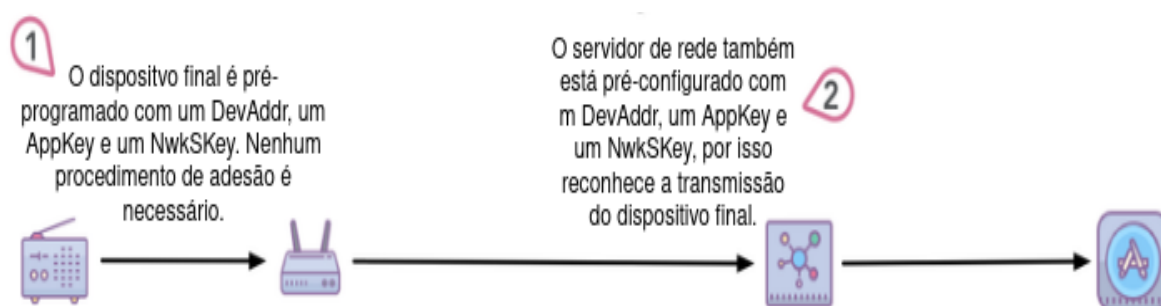


Figura 16. Comunicação de um dispositivo final e servidor na ativação ABP.
Fonte: Adaptado de [31].

A ativação ABP tem a vantagem de possuir uma comunicação mais simples, sem a necessidade de realizar o procedimento de join. Por outro lado, possui desvantagens em relação a segurança, pois as chaves utilizadas serão permanentes [26, 5].

2.3.3.2 Ativação OTAA

Na ativação OTAA, os dispositivos enviam uma mensagem denominada *join*, na qual realiza a integração dos end-devices na rede. As chaves/parâmetros DevAddr, NwkSKey e AppSKey, diferentemente do processo de ativação ABP, não são permanentes, mas gerados a cada novo *join* realizado pelo dispositivo [26, 5].

Para essa ativação, outras três informações são necessárias, as quais são permanentes e pré-configuradas no end-device: *End-Device Identifier* (DevEUI), *Join-Server Identifier* (JoinEUI) e *Application Key* (AppKey). O DevEUI e o JoinEUI são IDs globais de 64 bits no padrão IEEE EUI64. A AppKey é uma chave AES-128 [26, 5].

A cada inicialização (Figura 17) do end-device é enviado um *Join Request*, após recebido pelo Network Server, acontece a resposta da mensagem, *Join Accept*. Nesta troca de informações acontece a derivação das chaves NwkSKey e AppSKey, com a ajuda do identificador JoinEUI. Uma vez realizado o processo de ativação o end-device está apto para enviar os dados [26, 5].

A ativação OTAA é mais complexa em sua implementação, mas é compensada por possuir mais segurança devido à redefinição das chaves de criptografia. Outra vantagem é a possibilidade de o end-device se reconectar em uma nova rede sem precisar ser reprogramado [26, 5].

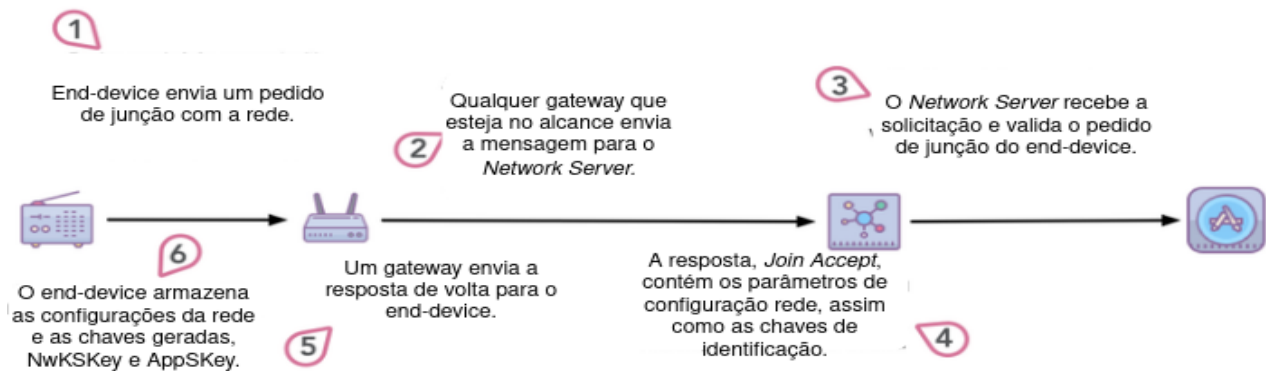


Figura 17. Comunicação de um dispositivo final e servidor na ativação OTAA.
Fonte: Adaptado de [31].

2.3.4 Data Rate e Adaptive Data Rate

O *Data Rate* (DR) é um parâmetro que denomina a relação entre os valores do *Spreading Factor* (SF) e o *Bandwidth* (BW), e com isso altera a taxa de dados que o dispositivo é capaz de enviar. Essa combinação dos parâmetros são numerados por índices que parte do DR0 ao DR15. Os índices indicam que se o alcance de transmissão for maior, devido ao SF maior, menor será a taxa de dados que pode ser enviada, como pode ser

observado na Tabela 3, que representa os valores do DR no plano de frequências AU-915 [32].

Tabela 3. Data Rates do plano AU-915 [32].

Data Rate	Configuração	Taxa de dados (bps)	Uso
DR0	SF12 / 125 kHz	250	<i>uplinks</i>
DR1	SF11 / 125 kHz	440	<i>uplinks</i>
DR2	SF10 / 125 kHz	980	<i>uplinks</i>
DR3	SF9 / 125 kHz	1760	<i>uplinks</i>
DR4	SF8 / 125 kHz	3125	<i>uplinks</i>
DR5	SF7 / 125 kHz	5470	<i>uplinks</i>
DR6	SF8 / 500 kHz	12500	<i>uplinks</i>
DR7	RFU		
DR8	SF12 / 500 kHz	980	<i>Downlinks</i>
DR9	SF11 / 500 kHz	1760	<i>Downlinks</i>
DR10	SF10 / 500 kHz	3900	<i>Downlinks</i>
DR11	SF9 / 500 kHz	7000	<i>Downlinks</i>
DR12	SF8 / 500 kHz	12500	<i>Downlinks</i>
DR13	SF7 / 500 kHz	21900	<i>Downlinks</i>
DR14	RFU		
DR15	RFU		

Nos end-devices, os índices do *Data Rate* podem ser gerenciados automaticamente pelo protocolo LoRaWAN, por meio do *Adaptive Data Rate* (ADR). Esse recurso quando utilizado minimiza o uso da bateria alterando a taxa de dados e a potência de transmissão de cada dispositivo. Essa funcionalidade é realizada pelo *Network Server*, na qual são analisados alguns parâmetros, como o *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), que fornece o valor máximo necessário para que seja possível decodificar com precisão os pacotes. O Fator de Espalhamento também é ajustado pelo *Network Server*, dependendo da distância do end-device em relação ao gateway. Quando o dispositivo está próximo ao gateway, o ADR tende a configurar-ló com valores menores para SF e com potência de transmissão reduzida, isso acontece na forma inversa, aumentando o SF e a potência de transmissão em distância maiores [32, 33].

2.3.5 Parâmetros regionais

Como LoRaWAN opera em espectro de rádio não licenciado, qualquer pessoa pode usar as frequências de rádio. As frequências utilizadas são mais baixas com alcance maior. Devido ao alcance mais longo, mais restrições são impostas e são específicas de cada país [34].

Os parâmetros regionais aplicam as restrições estabelecidas pela *LoRa Alliance* para que as redes LoRaWAN operem corretamente. Ao total, são 10 planos regionais em

vigor em todo o globo, e no Brasil, estão regulamentados os planos da Austrália (AU-195) e da Europa (EU-433) [32].

O plano mais utilizado no Brasil é o AU-915 (Figura 18) que opera na faixa de frequências de 915 a 928 MHz. É dividido em 64 canais *uplink* com o BW de 125 kHz, variando do DR0 ao DR5, em verde. Em azul, são 8 canais *uplink* com BW de 500 kHz e 8 canais de *downlink* com BW de 500 kHz, em amarelo [32].

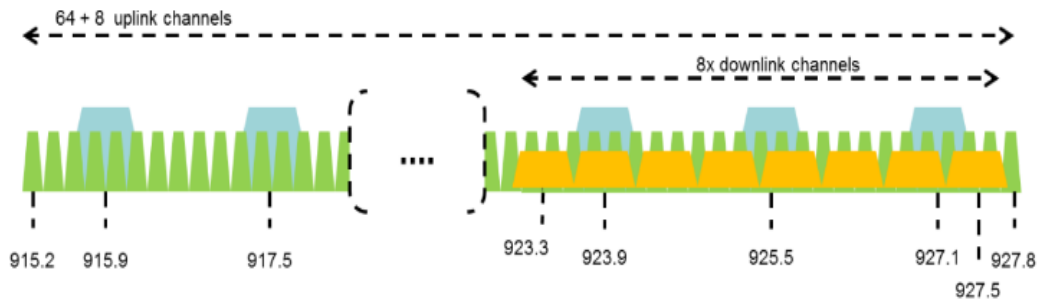


Figura 18. Canais de frequência AU915. Os 64 canais uplink com BW de 125 kHz, variando do DR0 ao DR5, em verde. Em azul são os 8 canais uplink com BW de 500 kHz, e em amarelo, são os 8 canais de downlink com BW de 500 kHz [32].

Outros parâmetros regionais definidos são o *Dwell Time*, *Duty Cycle* e o EIRP. O primeiro faz referência ao tempo máximo permitido para a transmissão de uma mensagem LoRaWAN; o segundo, é o tempo máximo em que um dispositivo pode ocupar o mesmo canal LoRa; e por fim, o EIRP, a máxima potência de rádio que pode ser irradiada pelo módulo LoRa. Em relação ao plano AU-915, a potência máxima EIRP é de 30 dBm, para o *Dwell Time* o limite é de 400 ms e para o *Duty Cycle* não há limitações [32].

2.3.6 Formato dos frames

Os frames utilizados pelo LoRaWAN são observados na Figura 19. A camada física começa pelo *preamble*, na qual define a modulação do pacote. Após o *preamble* (ou preâmbulo), existe um cabeçalho opcional (*Header* e *Header CRC*). Caso esse cabeçalho esteja presente ele indica qual o tamanho do *payload* (em bytes), o *code rate* utilizado e se um CRC está ou não presente no final do frame. O CRC permite que o receptor das mensagens possa descartar pacotes com cabeçalhos inválidos [16].

O *PHY Payload* é enviado após o cabeçalho, composto pelo *MAC Header*, *MAC Payload* e o MIC (*Message Integrity Code*). O primeiro define a versão do protocolo e o tipo da mensagem, se é um dado, se é *uplink* ou *downlink*, e se a mensagem enviada precisa conter confirmação de recebimento. O *MAC header* é seguido pelo *MAC Payload*, que é o campo que contém dados da camada de aplicação. O MIC é a informação que verifica a integridade dos dados [36, 16].

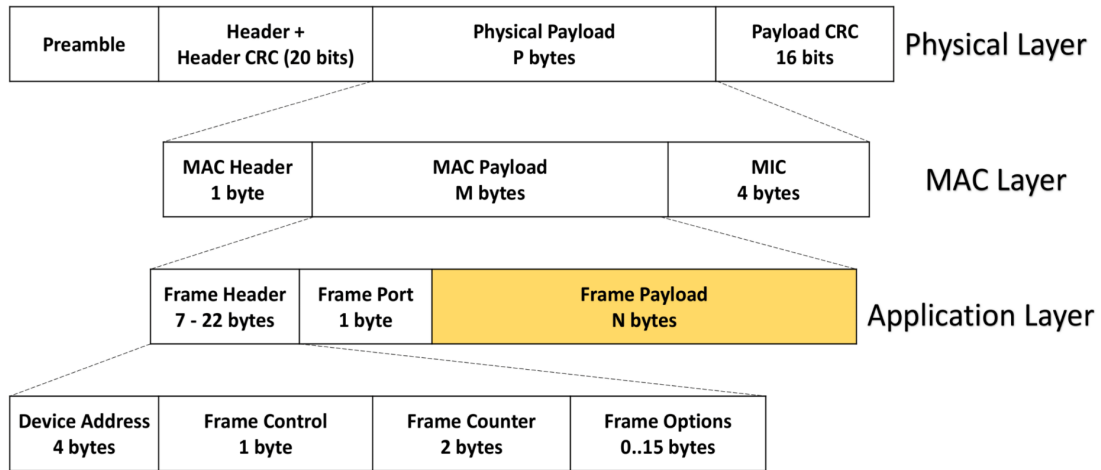


Figura 19. Formato dos frames das mensagens LoRaWAN [35].

O *MAC Payload* é formado pelo *Frame Header* que dispõem de diversos dados: informações de endereço do dispositivo, contador de frames, que contém comandos como o data rate e poder de transmissão e o controle de downlink pendentes. No *MAC Payload*, também está presente o *Frame Port*, na qual são valores que distinguem diversos fluxos entre o gateway e o dispositivo end-device, indicando a porta de comunicação da mensagem. Por fim, o *Frame Payload* que informa os valores dos comandos MAC [36].

2.4 PROJETO MINI-ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

O projeto de coleta de dados meteorológicos para aplicação na agricultura começou o desenvolvimento do trabalho de [1], no qual foi projetado um dispositivo de baixo custo e capaz de enviar as informações a longa distâncias com o módulo de comunicação sem fio LoRa. Posteriormente, no trabalho de [13], com advento das tecnologias de longo alcance e baixo consumo de energia, foram desenvolvidas mini-estações para coleta de dados pontuais utilizando o dispositivo desenvolvido (Figura 20).

2.4.1 Hardware utilizado

O projeto desenvolvido visou o baixo consumo de energia e o baixo custo na produção dos dispositivos. Nesta seção são abordados os componentes utilizados no desenvolvimento do sistema embarcado.



Figura 20. Mini-estações meteorológicas com comunicação LoRa (SensorOn) [1].

2.4.1.1 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado é o ATmega328p (Figura 21), desenvolvido pela Microship. Esse microcontrolador é de 8-bit baseado na arquitetura RISC, com 32KB de memória flash, 1024B de memória EEPROM, 2KB SRAM, 23 pinos de entrada e saída para propósito geral. Esse microcontrolador possui diversas interfaces de comunicações como SPI e conversor A/D [37]. O microcontrolador pode ser encontrado no sistema embarcado Arduino Nano, fabricado pela Arduino.



Figura 21. Microcontrolador ATmega328p [38].

Esse microcontrolador foi escolhido pois é um dispositivo de baixo consumo de energia, trabalhando com 0.2mA, e em modo de baixo consumo com 0.1 μ A [37]. Atualmente, o custo de aquisição varia entre R\$ 18.00 a R\$ 22.00 reais no mercado brasileiro.

Esse dispositivo faz o controle do módulo de comunicação LoRa, leitura de sensores para a coleta de dados e armazenamento de informações em memória.

2.4.1.2 Módulo LoRa

Neste projeto foi utilizado o módulo RMF95, fabricado pela Hope RF. É um módulo de baixo custo que trabalha na frequência de 915MHz (Figura 22). Esse intervalo de frequência está dentro do padrão para ser utilizado no Brasil, que é o mesmo padrão Norte Americano [39].

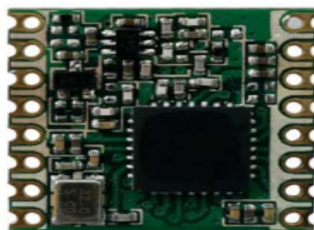


Figura 22. Módulo RMF95 [39].

Esse *transceiver* (transceptor) funciona de 10.8 a 12.1mA quando está em modo de recebimento. Em modo de transmissão seu consumo varia de 120 a 20mA e em modo *sleep* seu consumo é 0.2 μ A. Seu custo no mercado brasileiro varia entre R\$ 50.00 a R\$ 70.00 [39].

O *transceiver* RFM95 é composto pelo LoRa que fornece a modulação *spread spectrum* para comunicação de longa distância e baixo consumo.

2.4.1.3 Controlador de tempo

O dispositivo DS3231, também chamado RTC - *Real Time Clock*, é um circuito integrado responsável por fazer a contagem dos anos, meses, dias, horas, minutos e segundos (Figura 23). Possui dois alarmes programáveis que geram pulsos [40].



Figura 23. RTC DS3231 [41].

Seu consumo em modo de operação está entre 200 e 300 μ A e em modo de baixo consumo de energia de 110 a 170 μ A. O preço desse dispositivo varia entre R\$18.00 a R\$ 28.00 [40].

O DS3231 faz o controle do tempo para que os dispositivos possam estar sincronizados e enviar e receber dados nos tempos desejados. Inicialmente o RTC recebe a data e hora atual para começar a contar o tempo, após isso, é realizada a configuração de um ou dos dois alarmes disponíveis. Depois da sua configuração em tempo de compilação, o RTC conta até o tempo configurado, e manda um pulso para o microcontrolador em alguma porta de comunicação em que está conectado. Esse pulso enviado do RTC ao microcontrolador alerta o microcontrolador sobre o início da transmissão ou da recepção de pacotes.

2.4.1.4 Sensor de temperatura e Umidade Relativa

Para a coleta de informações, como temperatura e umidade relativa, foi utilizado o sensor SHT20 desenvolvido pela Sensirion (Figura 24). É um dispositivo calibrado, com saída digital I2C e excelente estabilidade a longo prazo [42].

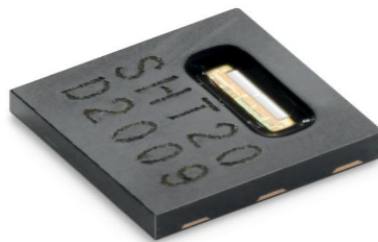


Figura 24. Sensor de umidade relativa e temperatura [42].

Seu consumo em modo de operação está entre 200 e 330 μ A e em modo sleep sua corrente fica em 0.15 μ A. O preço desse dispositivo varia entre R\$ 30.00, sem cápsula de proteção a R\$ 150.00 com cápsula de proteção. A acuracidade deste sensor em relação a umidade relativa está em +- 3% e em relação a temperatura +-0.3 $^{\circ}$ C [42].

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

No trabalho de [43] e [44] foram utilizados o mesmo princípio de um protocolo de *multi-hop*, chamado LoRaBlink. Esse protocolo tem seu funcionamento baseado no envio de *beacons* para determinar quem são os dispositivos que estão em seu alcance e qual é a sua distância para o gateway.

A diferença entre os trabalhos é que o projeto desenvolvido por [44], seu protocolo visa uma rede com diversos saltos, utilizando um vetor de endereços. Cada dispositivo na rede LoRaWAN possui uma tabela de roteamento que contém os dispositivos de destino próximos a ele. Essa tabela de roteamento é atualizada através do envio de *beacons* e, assim, é possível verificar os nodos que estão no seu alcance. Os testes realizados com um dispositivo repetidor não levaram em conta o seu consumo de energia do dispositivo.

No projeto de [43] a comunicação entre os dispositivos acontece apenas em dois saltos, adicionando um dispositivo entre o gateway e o end-device. O dispositivo repetidor desenvolvido visa o baixo consumo de energia. Para que isso aconteça foi desenvolvido um algoritmo, para o dispositivo repetidor, que primeiramente faz uma varredura na rede LoRaWAN buscando dispositivos que estão ao seu alcance. Após essa varredura o dispositivo entra em modo de baixo consumo, acordando apenas nos horários definidos na etapa de varredura. Os testes de consumo mostraram que o dispositivo repetidor, que recebe os dados de outros dispositivos, é capaz de ficar mais de nove anos de operação com ciclos de três horas, acordando 3 vezes dentro dessas horas.

Já no trabalho de [45], foi desenvolvido um repetidor de baixo consumo e baixo custo, utilizando componentes de fácil acesso, pois com o seu uso é descartada aquisição de um gateway, sendo esse um componente de alto valor agregado. O dispositivo criado tem como o objetivo melhorar a taxa de entrega dos pacotes enviados pelos end-devices. O repetidor é totalmente transparente para a rede LoRaWAN, na qual os end-devices transmitem seus dados para o repetidor através do protocolo LoRaWAN e logo são retransmitidos para o gateway. O dispositivo repetidor suporta dispositivos da Classe A, operando somente em uma frequência. O repetidor fica sempre ligado, apenas mudando o estado do módulo LoRa quando for necessário enviar ou receber dados, assim, pode ser alimentado por fontes alternativas, como um painel fotovoltaico. Os testes comparativos realizados por Mazier, ocorreram na Universidade Federal de Santa Maria - UFSM que demonstram a melhora na entrega dos pacotes utilizando um dispositivo repetidor.

Um dispositivo de retransmissão de pacotes LoRaWAN também foi desenvolvido no trabalho de [46]. Foram utilizados dispositivos de maior processamento e de custo mais elevado para o desenvolvimento, pois o dispositivo pode receber dados simultâneos, de diversos end-devices. Os pacotes *uplink* recebidos pelo repetidor são reenviados até o gateway. Da mesma forma acontece o *downlink*, após o recebimento da mensagem ela reencaminhada até o dispositivo final. Este trabalho foi implementado em um laboratório industrial e os resultados apresentaram que este equipamento é transparente em uma rede LoRaWAN e pode ser utilizado no ambiente de teste em que foi realizado.

Os trabalhos relacionados não abordaram dispositivos com mais de um salto entre o gateway e os end-devices sem a utilização de *beacons* para sincronismo. Devido a isso, este trabalho apresenta uma rede LoRaWAN com dois dispositivos intermediários entre o gateway e os end-devices.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do dispositivo repetidor, *r-node*, que foi inserido em uma rede LoRaWAN e posteriormente realizados testes de seu funcionamento em diferentes configurações de rede, de hardware e de software.

O repetidor é incorporado na rede entre os end-devices e o gateway (Figura 25), na qual os end-devices estão sem comunicação com o gateway. Os repetidores são inseridos na rede para que as mensagens possam chegar até o destino. As linhas verdes indicam que os dispositivos possuem alcance necessário entre o transmissor e o receptor utilizando a tecnologia LoRa para a transmissão. As linhas vermelhas apresentam uma inexistente comunicação entre os dispositivos. A linha azul é a comunicação com a internet para envio das mensagens até o servidor. As frequências dos end-devices e do repetidor devem ser as mesmas para que as mensagens possam ser retransmitidas.

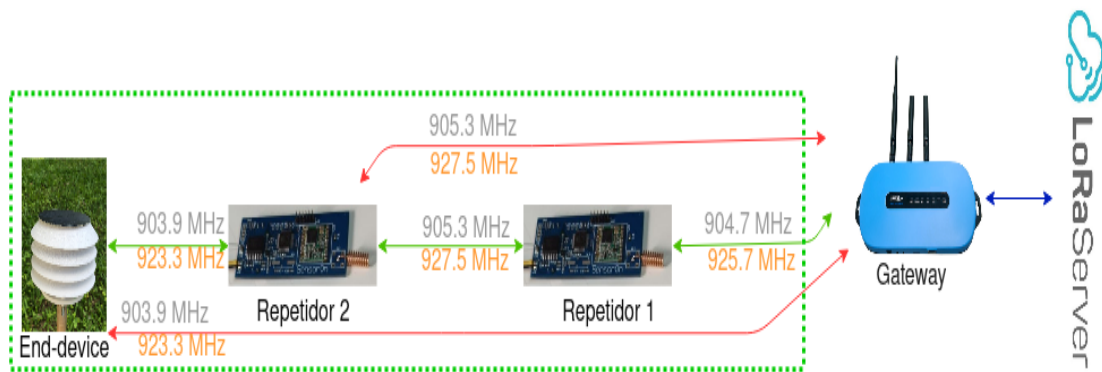


Figura 25. Exemplo da arquitetura de rede com a inserção do dispositivo *r-node*. As linhas verdes indicam que os dispositivos possuem alcance necessário entre o transmissor e o receptor utilizando a tecnologia LoRa para a transmissão. As linhas vermelhas mostram que não existe comunicação entre os dispositivos. A linha azul é a comunicação com a internet para envio das mensagens até o servidor. *r-node*.

3.1 HARDWARE

Para o desenvolvimento do *r-node*, foram utilizados os dispositivos desenvolvidos por [1], citado anteriormente, e foram projetados outros repetidores utilizando o sistema embarcado Arduino Nano disponível no mercado. Foi utilizado o gateway Sentries RG191 para que fosse possível realizar a comunicação entre os elementos da rede LoRaWAN.

O hardware embarcado utilizado foi o Arduino Nano (Figura 26) que possui o mesmo microprocessador, Atmega328p, dos dispositivos de [1]. Esse dispositivo pode ser

encontrado no mercado com preços que variam entre R\$ 24.00 a R\$ 40.00. Com isso, foi realizada a montagem do dispositivo repetidor, Arduino Nano juntamente com o módulo LoRa RMF95, como é possível observar na Figura 27 as conexões necessárias para a realização da comunicação. A antena utilizada foi um fio de 7,8 cm de comprimento necessário para a frequência utilizada de 915 MHz [47]. Na Figura 28, é apresentado o dispositivo repetidor após a soldagem do módulo LoRa juntamente com o Arduino Nano.



Figura 26. Arduino Nano [38].

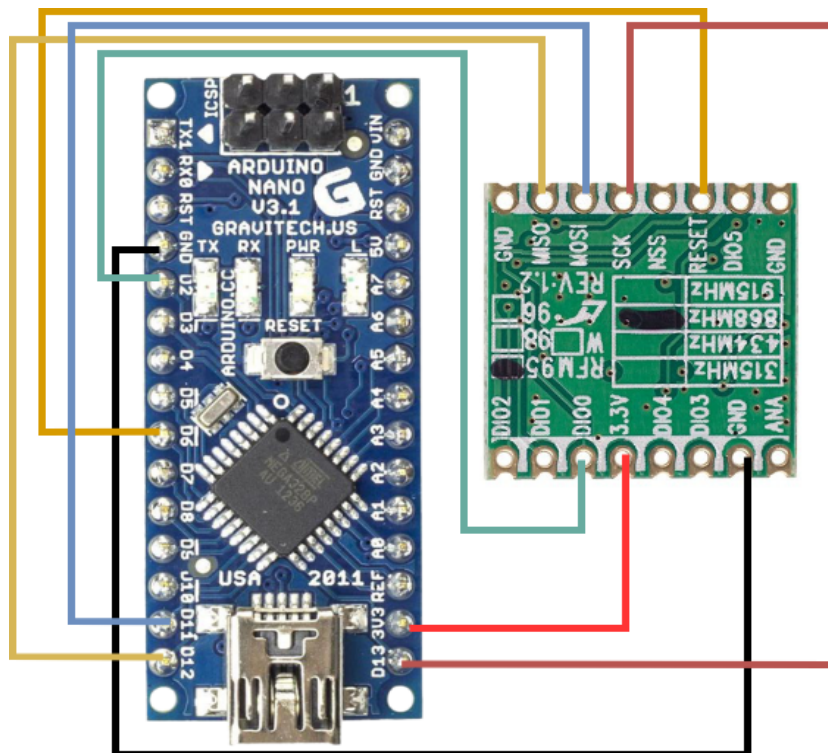


Figura 27. Hardware do dispositivo repetidor. Arduino nano e módulo LoRa RMF95.

Em relação a fonte de energia, os dispositivos repetidores foram desenvolvidos sem levar em consideração o consumo de energia, com isso ele foi alimentado com uma

fonte ilimitada de energia. O dispositivo RTC não precisou ser utilizado, pois não se faz necessário a utilização de funções sleep para diminuir o consumo de energia.

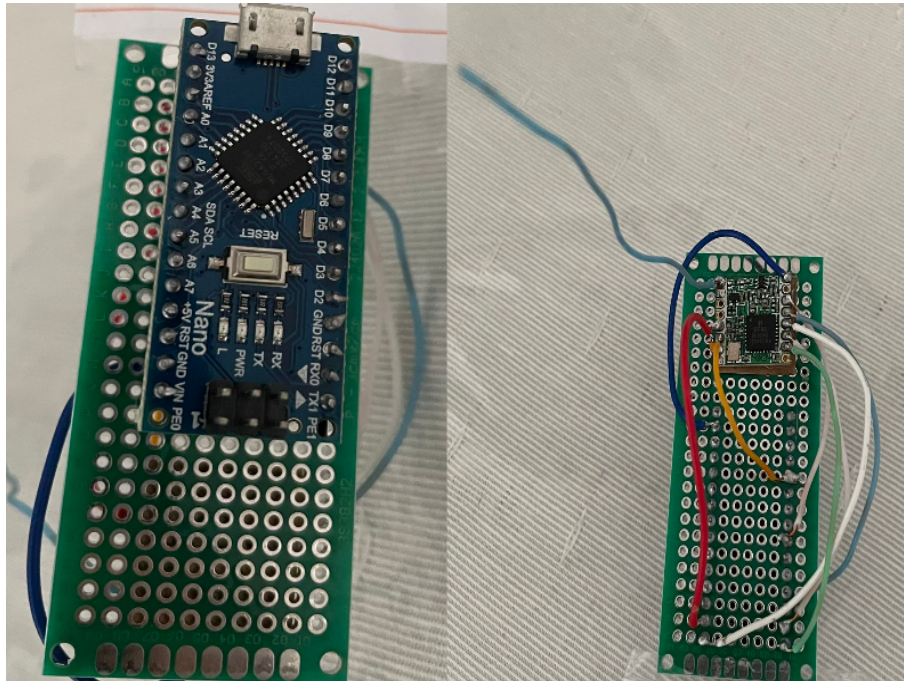


Figura 28. Dispositivo repetidor desenvolvido utilizando Arduino Nano e Módulo RMF95.

O gateway utilizado para receber as mensagens do end-devices e repetidor e envia-lás para algum servidor LoRa é o Sentiur RG191 desenvolvido pela empresa Laird Connectivity (Figura 29). É um gateway LoRaWAN seguro, escalável e robusto. Ele oferece conexão Wi-Fi ou ethernet, trabalha nas faixas de frequência LoRa US902-928 com um alcance de até 16Km. Seu sistema operacional é um Linux que faz todo o gerenciamento do processador Atmel A5 e dos oito canais LoRaWAN suportados [48] .



Figura 29. Gateway Sentiur RG191 [48].

O gateway tem a função de receber as mensagens dos end-devices ou dos repetidores por meio do protocolo LoRaWAN e envia-lás para o servidor The Things Network,

3.2.2, por meio da conexão Wi-Fi ou ethernet. Como possui oito canais LoRaWAN, esse gateway pode receber diversas mensagens simultâneas.

Esse gateway possui canais de frequência Americano, mas isso não altera o funcionamento dos dispositivos, pois os parâmetros regionais, como o EIRP e o *Dwell Time* são os mesmo do plano AU915. Na Figura 30, é possível observar que as diferenças ficam na faixa de frequências utilizadas.

US902-928	AU915-928
Used in USA, Canada and South America	Uplink:
Uplink:	1. 916.8 - SF7BW125 to SF12BW125
1. 903.9 - SF7BW125 to SF10BW125	2. 917.0 - SF7BW125 to SF12BW125
2. 904.1 - SF7BW125 to SF10BW125	3. 917.2 - SF7BW125 to SF12BW125
3. 904.3 - SF7BW125 to SF10BW125	4. 917.4 - SF7BW125 to SF12BW125
4. 904.5 - SF7BW125 to SF10BW125	5. 917.6 - SF7BW125 to SF12BW125
5. 904.7 - SF7BW125 to SF10BW125	6. 917.8 - SF7BW125 to SF12BW125
6. 904.9 - SF7BW125 to SF10BW125	7. 918.0 - SF7BW125 to SF12BW125
7. 905.1 - SF7BW125 to SF10BW125	8. 918.2 - SF7BW125 to SF12BW125
8. 905.3 - SF7BW125 to SF10BW125	9. 917.5 - SF8BW500
9. 904.6 - SF8BW500	
Downlink:	Downlink:
1. 923.3 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	1. 923.3 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
2. 923.9 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	2. 923.9 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
3. 924.5 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	3. 924.5 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
4. 925.1 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	4. 925.1 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
5. 925.7 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	5. 925.7 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
6. 926.3 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	6. 926.3 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
7. 926.9 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	7. 926.9 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
8. 927.5 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)	8. 927.5 - SF7BW500 to SF12BW500 (RX1)
9. 923.3 - SF12BW500 (RX2)	9. 923.3 - SF12BW500 (RX2)

Figura 30. Diferença do plano de frequências entre US915 e AU915 [34].

3.2 FERRAMENTAS DE SOFTWARE

3.2.1 Visual Studio Code com PlatformIO

Como editor de código-fonte foi utilizado o Visual Studio Code, desenvolvido pela Microsoft. Ele é composto por diversas funcionalidade como integração com o Git para controle de versão de código, suporte para depuração e além disso é possível instalar extensões para utilizar diversos recursos, um desses é o PlatformIO.

O PlatformIO é uma ferramenta profissional para sistemas embarcados, dispendo de múltiplos frameworks e arquiteturas que podem ser utilizadas. Essa ferramenta é utilizada para gravar os códigos nos dispositivos embarcados. O PlatformIO elimina toda a complexidade, pois possui uma estrutura que aplica automaticamente as dependências do

software que estão sendo utilizadas. Além disso, ela faz toda a integração com diferentes plataformas de hardware, possui bibliotecas que podem ser instaladas diretamente de sua IDE e é possível compartilhar projetos entre membros da equipe, independentemente do sistema operacional utilizado [49].

Para a gravação de códigos nos dispositivos o PlatformIO utiliza um arquivo de configuração do projeto chamado `platformio.ini`, no qual é definido a placa utilizada, porta de comunicação, velocidade do monitor serial, etc. Com base na placa definida, o PlatformIO baixa as ferramentas necessárias e os instala automaticamente. O código desenvolvido é compilado e enviado para as placas de interesse utilizando o PlatformIO [49].

3.2.2 The Things Network - TTN

A TTN foi utilizada neste trabalho pois é uma rede da *Internet of Things* onde dispositivos comunicam-se com gateways por meio do protocolo LoRaWAN, os quais enviam os dados recebidos para servidores próprios da TTN, utilizando 4G ou WiFi [50]. Para que essa comunicação aconteça é necessário fazer o registro de cada dispositivo. O end-device deve ser registrado para conseguir fazer parte de uma rede LoRaWAN. Ele pode ser ativado por meio de OTAA, *Over-The-Air Activation*, ou ABP, *Activation By Personalization*. Para registrar um gateway é necessário informar o local em que esse dispositivo ficará, pois ao contrário dos end-devices o gateway possui sua localização fixa.

Atualmente, a nova versão do TTN está disponível, *The Things Stack*², que pretende ser mais segura e escalável. Com isso, foi necessário fazer a migração de todos os dispositivos da antiga plataforma para a nova.

3.2.3 Cayenne Low Power Payload - LPP

Cayenne LPP é uma biblioteca de envio de dados por meio de redes LPWAN, por exemplo LoRaWAN. Ela permite que os desenvolvedores criem protótipos e possam compartilhar seus projetos baseados em IoT. A Cayenne permite o envio de dados de diversos tipos de sensores. Para que isso aconteça, cada dado do dispositivo é pré-fixado com dois bytes: o canal de dados que identifica cada sensor e os tipos de dados que identifica qual dado está sendo enviado, por exemplo, "umidade", (Figura 31).

Cada tipo de dado é compactado de forma diferente, para que ocupem o menor número de bytes possíveis [52]. Na Figura 32 pode ser visto um exemplo na estrutura de envio e compactação de dois dados. No primeiro byte é informado o canal, para diferenciar o sensor, no segundo byte é tipo do dado que está sendo enviado, no terceiro é o valor do

²<https://www.thethingsindustries.com/stack/>

1 Byte	1 Byte	N Bytes	1 Byte	1 Byte	M Bytes	...
Data1 Ch.	Data1 Type	Data1	Data2 Ch.	Data2 Type	Data 2	...

Figura 31. Formato das mensagens com dados pré-fixados utilizando o Cayenne [51].

dado compactado, ocupando dois bytes, pois o dado que está sendo enviado é de temperatura. Essa forma de compactação foi utilizada nos dados enviados pelos end-devices.

Payload (Hex)	03 67 01 10 05 67 00 FF	
Data Channel	Type	Value
03 ⇒ 3	67 ⇒ Temperature	0110 = 272 ⇒ 27.2°C
05 ⇒ 5	67 ⇒ Temperature	00FF = 255 ⇒ 25.5°C

Figura 32. Exemplo de mensagem com envio de dois dados utilizando o Cayenne [51].

3.2.4 Biblioteca LoRaWAN

O protocolo LoRaWAN é um código aberto, podendo ser melhorado ou otimizado. Por isso, existem diversos repositórios no GitHub que fornecem a biblioteca completa utilizando o módulo LoRa. Estes repositórios são direcionados a dispositivos "folhas", end-devices.

A IBM LoRaWAN C-library (LMiC) é uma implementação para o LoRa MAC, desenvolvido na linguagem C. Esse protocolo é utilizado para realizar a comunicação entre um dispositivo e a plataforma *The Things Network*. Podendo trabalhar com dois módulos diferentes: o SX1272 e o SX1276. A biblioteca pode manipular dispositivos das Classes A e B. É capaz de cuidar de todos os estados lógicos do MAC e das restrições de tempo. Assim, a aplicação fica livre para executar outras atividades. A biblioteca foi pensada em uma maneira simples de programação que não precisa lidar com detalhes específicos da plataforma.

A LMiC possui diversas variações, pois como o LoRaWAN é um protocolo de código aberto, ele pode ser desenvolvido por qualquer empresa ou entusiasta. O LMiC de-

envolvido em 2015 por Mathijs Kooijman [53], suporta as frequências EU-868 e US-915, assim como suas variações. O segundo repositório é da empresa MCCI [54], que utilizou como base o LMIC, e começou a ser desenvolvido em 2018. É um repositório com mais recursos e funcionalidades em comparação com a LMIC. Ela utiliza mais memória do sistema embarcado devido aos seus recursos extras. É um repositório que desenvolve o protocolo LoRaWAN para os end-devices, assim, podendo realizar comunicações com gateways. Está disponível em mais faixas de frequências como a EU-868,US-915, AU-915, AS-923, KR-920 e IN-866, e suas variações.

As bibliotecas citadas ocupam muita capacidade de memória dos end-devices, com isso foi utilizada outra biblioteca, LoRaWanPacket [55], que além de não ocupar tanto espaço em memória, é possível realizar mudanças em suas configurações e funções, permitindo maior facilidade para ajuste de frequências e comportamentos de envios e recebimento de mensagens. Esta biblioteca, também foi utilizada nos repetidores, alterando o funcionamento de suas funções e das frequências de operação.

3.3 DISPOSITIVO *R-NODE*

Duas versões foram projetadas para analisar o comportamento do dispositivo de repetição (*r-node*) em relação ao envio de pacotes, uma com um módulo LoRa trabalhando com mensagens *uplink* e *downlink*, e outra com dois repetidores, porém cada um responsável por um tipo de mensagem. O objetivo do dispositivo é: a retransmissão de mensagens LoRaWAN de forma transparente; como objetivos específicos, que esse dispositivo de retransmissão (hardware) seja de baixo custo e que possa realizar a retransmissão tanto de pacotes *uplink* como de *downlink*, por meio de vários saltos.

Com a utilização da biblioteca LoRaWanPacket [55], foram realizadas alterações nas funções de envio e recebimento de mensagens para que fosse possível retransmitir as mensagens recebidas. Como a biblioteca foi desenvolvida para ser utilizada pelos end-devices, a primeira alteração foi a remoção de funções responsáveis pelo ciclo de envio de mensagens, pois o repetidor executa o processo de recebimento de mensagens antes do envio. A configuração de recebimento tanto de *uplink* como de *downlink* foram feitas levando em consideração os parâmetros de frequência, fator de espalhamento, entre outras, como apresenta a Figura 33(a). Novas configurações de frequências foram adicionadas para que fosse possível realizar as funções de receber e enviar as mensagens, Figura 33(b). Foram adicionadas duas configurações de frequências de envio e duas frequências de recebimento de mensagens.

(a)

```

struct LoRa_config
{
    long Frequency;
    int SpreadingFactor;
    long SignalBandwidth;
    int CodingRate4;
    bool enableCrc;
    bool invertIQ;
    int SyncWord;
    int PreambleLength;
};

```

(b)

```

static LoRa_config rxUplink = {903900000, 9, 125000, 5, true, false, 0x34, 8};
static LoRa_config txUplink = {904500000, 9, 125000, 5, true, false, 0x34, 8};
static LoRa_config txDownlink = {923300000, 9, 500000, 5, false, true, 0x34, 8};
static LoRa_config rxDownlink = {925100000, 9, 500000, 5, false, true, 0x34, 8};

```

Figura 33. Parâmetros e configuração das frequências de envio e recebimento de mensagens *uplink* e *downlink*: (a) parâmetros necessários para o envio e recebimento; (b) configuração das frequências de *uplink* e *downlink*.

3.3.1 *r-node* operando com *downlink* e *uplink*

Nesta versão do *r-node*, o dispositivo executa o recebimento e o envio tanto de mensagens *uplink* como de *downlink*. O ciclo de funcionamento do dispositivo é apresentado na Figura 34.

A função capaz de realizar a troca de mensagens tanto *downlink* como *uplink* está apresentada na Figura 36. O controle de envio e recebimento foi realizado pelas variáveis *state* e a *typeMessage*, responsável pela diferenciação entre os tipos de envio de mensagens. A seguir é abordado o funcionamento do *r-node* e sua troca de estados, como apresentado na Figura 35:

- Etapa 1 (recebimento de *uplink*): o dispositivo é configurado em modo de recebimento para receber mensagens *uplink*. A frequência e os parâmetros de comunicação foram configurados e ajustados no momento da gravação, conforme a configuração dos end-devices. As funções *Reset_Uplink()* e *LoRa_loop()* são responsáveis pela atualização e configuração do dispositivo para o modo de recebimento de *uplink*.
- Etapa 2 (envio de *uplink*): o repetidor recebe a mensagem, armazena em um vetor para ser retransmitida e muda seu estado para envio, configurando seus parâmetros e frequência para que o pacote seja enviado. Nessa etapa, a variável *state* e *typeMessage* estão com seu valor igual a 1, assim, é enviada a mensagem a partir da função *LoRa_sendMessageUplink()*. O valor da *typeMessage* e *state* é alterado para 2 ao fim dessa etapa.

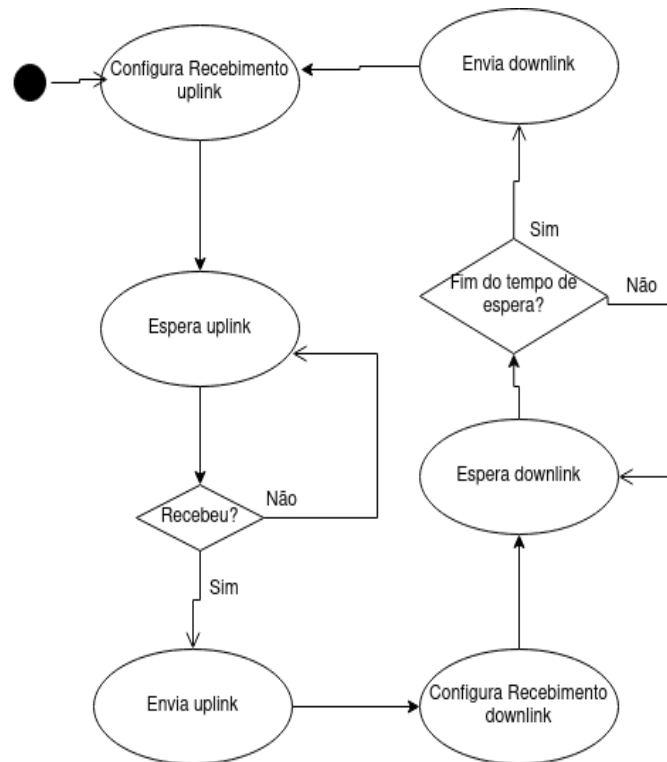


Figura 34. Fluxograma do funcionamento do *r-node* trabalhando com mensagens *uplink* e *downlink*.

- Etapa 3 (recebimento de *downlink*): após o envio da Etapa 2, ocorre uma nova mudança de estado do dispositivo, entrando em modo de recebimento. Nesta etapa é configurado para o recebimento de *downlink*. O tempo de espera para receber um *downlink* é de 5000 milissegundos. As funções `Reset_Downlink()` e `LoRa_RXDownlink()` configuram o dispositivo repetidor para receber *downlink*.
- Etapa 4: se após o tempo de espera de *downlink* nenhuma mensagem for recebida, o *r-node* entra em modo de recebimento de *uplink* novamente, assim, voltando para a Etapa 1.
- Etapa 5 (envio de *downlink*): se alguma mensagem de *downlink* for recebida, esta será armazenada em um vetor e o estado do dispositivo é alterado para envio de *downlink*. Para ter mais exatidão na entrega das mensagens *downlink*, foram utilizadas as duas janelas de recebimento dos end-devices, assim, o *r-node* envia na frequência correspondente a da primeira janela e após 1000 milissegundos envia na frequência da segunda janela. Finalizado o envio o dispositivo volta para a Etapa 1. O primeiro *downlink* é enviado por meio da função `LoRa_sendMessageDownlink()` e o segundo pela função `LoRa_sendMessageDownlinkSecond()`.

Após cada envio, tanto das mensagens *downlink* como *uplink*, foram inseridos tempos de espera para que fosse possível enviar as mensagens recebidas. Esse tempo

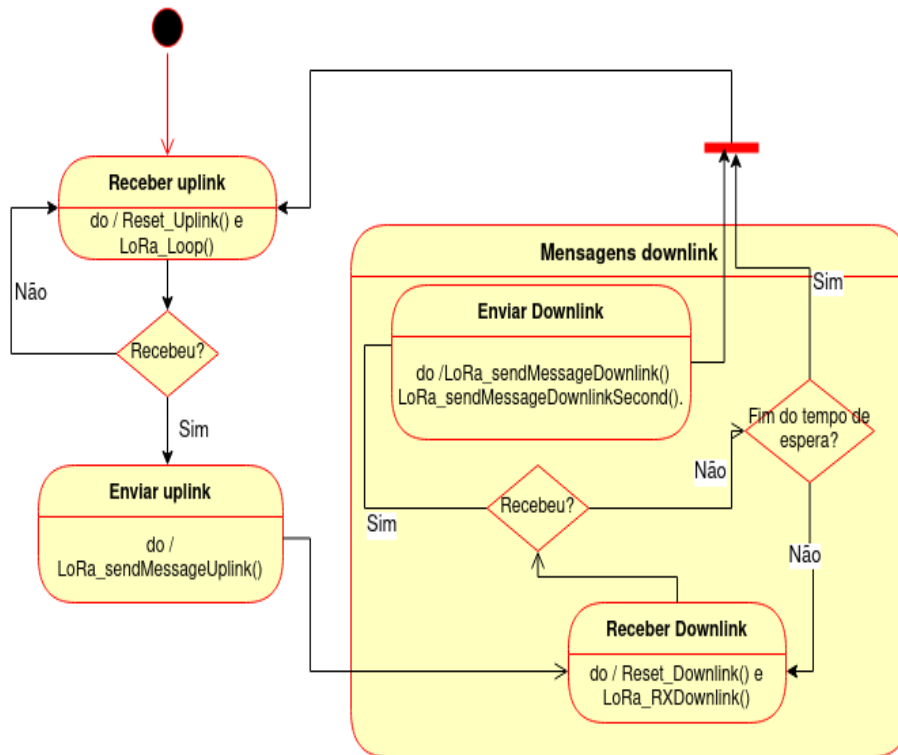


Figura 35. Diagrama de transição de estados do dispositivo repetidor com *uplink* e *downlink*.

garante para que não haja troca de estados do módulo LoRa até o termino do envio da mensagem. Esses tempos de espera são realizados pela função *delay*.

Devido à biblioteca LoRaWAN Packet ter sido desenvolvida para utilização em dispositivos end-devices, as funções citadas foram criadas para que os dispositivos repetidores pudessem realizar as trocas de mensagens.

3.3.2 *r-nodes* operando separadamente com um tipo de mensagem: *downlink* ou *uplink*

Nesta versão do dispositivo repetidor foi desenvolvido um algoritmo encarregado de trabalhar com cada tipo de mensagem separadamente, assim, um *r-node* ficou responsável pelo recebimento e envio de mensagens *uplink*, enquanto o outro pelas mensagens *downlink*. No fluxograma da Figura 37, estão representados os estados de cada *r-node*.

No *r-node uplink*, é configurada a frequência de recepção de *uplink*. Após o recebimento, a mensagem é enviada, e por fim, o dispositivo volta para o modo na qual aguarda *uplink* novamente. O *r-node downlink*, executa o mesmo ciclo, somente alterando as configurações para receber e enviar *downlink*.

O *r-node* foi desenvolvido dessa forma, não utilizando o mesmo microprocessador para controlar os dois módulos, pois o objetivo foi verificar se a entrega dos pacotes me-


```

1
2 void stateRepetidor(){
3   if (state == 0){
4     if (typeMessage == 2 && runEvery(2000)){
5       Reset_Downlink();
6       LoRa_RXDownlink();
7       contReceive++;
8     }else if (typeMessage == 1 && runEvery(2000)){
9       LoRa_onReceive(onReceive);
10      LoRa_onTxDone(onTxDone);
11    }
12    if (contReceive == 4)
13      state = 3;
14  }else if (state == 1){
15
16    if (typeMessage == 1)
17    {
18      typeMessage = 2;
19      state = 2;
20      Reset_Uplink();
21      LoRa_sendMessageUplink();
22      delay(900);
23    }else{
24
25      Reset_Downlink();
26      LoRa_sendMessageDownlink();
27      delay(700);
28      cont++;
29      Reset_Downlink();
30      LoRa_sendMessageDownlinkSecond();
31      delay(800);
32      state = 3;
33    }
34  }
35  }else if (state == 2){
36    Serial.println("Configurado para receber downlink");
37    Reset_Downlink();
38    LoRa_RXDownlink();
39    state = 0;
40  }else if (state == 3){
41    typeMessage = 1;
42    contReceive = 0;
43    Reset_Uplink();
44    LoRa_loop();
45    Serial.println("Configuração Uplink");
46    state = 0;
47  }
48 }

```

Figura 36. Código da função responsável pelo recebimento e envio de mensagens *downlink* e *uplink*.

Ihorou utilizando-se dois módulos. Os resultados comparativos são abordados no próximo capítulo.

3.4 CONFIGURAÇÃO DOS END-DEVICES

Os end-devices utilizam a comunicação da Classe A, para que tenha maior eficiência energética. Estes foram configurados para que enviassem suas mensagens em apenas uma frequência e fator de espalhamento. Isso foi feito, para que o repetidor possa receber todas as mensagens enviadas pelos dispositivos finais. Desta forma, o *Adaptive Data Rate* não está presente, pois esse recurso ajusta automaticamente os parâmetros de comunicação dos end-devices e inviabiliza a implementação do dispositivo repetidor, devido ao modo em que os *r-nodes* foram desenvolvidos neste trabalho.

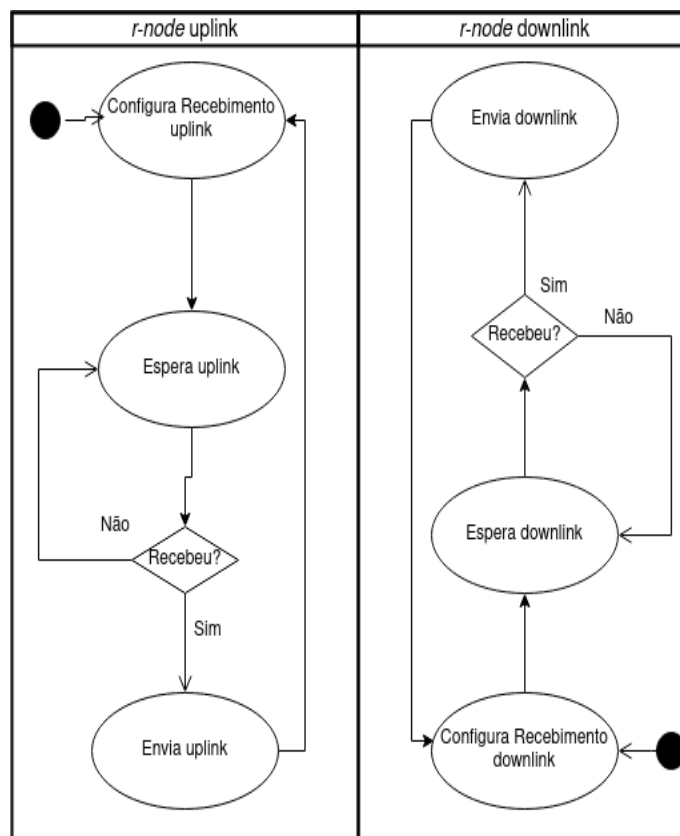


Figura 37. Fluxograma do funcionamento dos *r-nodes* com os ciclos de trabalho diferentes, um responsável por mensagens *uplink* outro pelas mensagens *downlink*.

Para mensagens *downlink* foi realizado a implementação de um contador interno nos end-devices. Esse contador incrementa seu valor toda vez que alguma mensagem *downlink* é recebida na porta pré definida no momento da gravação do código no dispositivo end-device. No painel do *Network Server*, é possível enviar mensagens *downlink* e escolher em qual porta essa mensagem deve ser enviada, assim, o end-device recebe na porta especificada para contabilizar o recebimento da mensagem. Na Figura 38, é apresentado os campos correspondentes para a seleção do número da porta, em azul, e para o conteúdo da mensagem, em vermelho. As mensagens *downlink* são enviadas na porta dois, assim, o contador só incrementa seu valor caso alguma mensagem for recebida na porta descrita. No pacote de envio dos end-devices foi inserido o valor do contador, assim, podendo observar o valor do contador e o total de mensagens *downlink* que foram recebidas.

Na Figura 39 é apresentado o fluxograma de funcionamento do end-device. O dispositivo inicia seu ciclo enviando a mensagem de *join*, após recebida a resposta é enviada a primeira mensagem contendo dados, na qual está presente a quantidade de mensagens *downlinks* recebidas. Ao término do envio, o dispositivo entra em modo de baixo consumo e com a utilização do contador interno irá dormir até o tempo pré-configurado. Com o fim do tempo de baixo consumo uma nova mensagem é enviada e novamente é executada a função de baixo consumo.

Uplink **Downlink**

Schedule downlink

Insert Mode

Replace downlink queue

Push to downlink queue (append)

FPort*

2

Payload type

Bytes JSON

Payload

11 22

The desired payload bytes of the downlink message

Confirmed downlink

Schedule downlink

Figura 38. Painel de envio de mensagens *downlink* do *Network Server*, The Things Stack. No retângulo azul, está presente o campo para inserir o número da porta. No retângulo vermelho, o conteúdo da mensagem *downlink*.

3.5 CALCULO DA PERDA DE PACOTES

Para realizar o cálculo de mensagens *uplink* perdidas, foi realizada a subtração das mensagens que foram recebidas pelo *Network Server*, em azul, e as mensagens *downlink* enviadas automaticamente, em vermelho, (Figura 40(a)). O limite de *downlink* permitido pelo The Things Stack são de 10 mensagens diárias, portanto não foram utilizados essas mensagens de confirmação para realizar a contagem de mensagens recebidas. Dessa forma, para *downlink* (Figura 40(b)) foi observado um contador do end-device em cada mensagem enviada para o servidor, como explicado anteriormente.

Para analisar a efetividade de transmissão do *r-node*, foi verificado a taxa de perda de pacotes, quanto menor esse valor mais efetivo é o envio das mensagens enviadas pelo dispositivo repetidor. A realização do cálculo da taxa de perda foi realizada pela Equação 1. A variável LPup é relacionada aos pacotes perdidos e variável UpR são o total de mensagens enviadas.

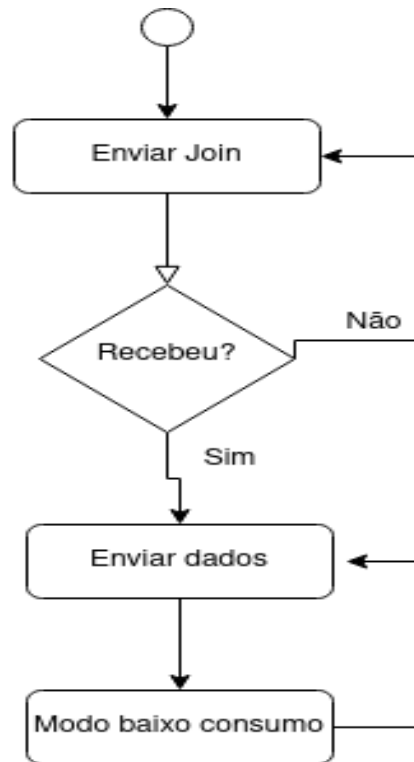


Figura 39. Fluxograma do funcionamento dos dispositivos end-devices.



Figura 40. Painel do *Network Server*, The Things Stack: (a) valor dentro do contorno azul são as mensagens *uplink* recebidas e o vermelho as mensagens *downlink* de confirmação enviadas; (b) conteúdo da mensagem enviada e no retângulo azul, as mensagens *downlink* recebidas.

$$TaxaPerda = \frac{LP_{up} \times 100}{U_{pR}} \quad (1)$$

4. ANÁLISE E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio dos estudos realizados e também as configurações necessárias para o funcionamento correto da rede LoRaWAN com um ou dois dispositivos repetidores inseridos.

4.1 CONFIGURAÇÃO DA REDE

O gateway Laird utilizado foi configurado para que as mensagens enviadas pelos end-devices não fossem recebidas, desta forma, garantindo a recepção das mensagens enviadas apenas pelo dispositivo repetidor. A configuração foi realizada no painel de configuração do gateway (Figura 41) e desativado o canal da frequência em que os end-devices estavam transmitindo.

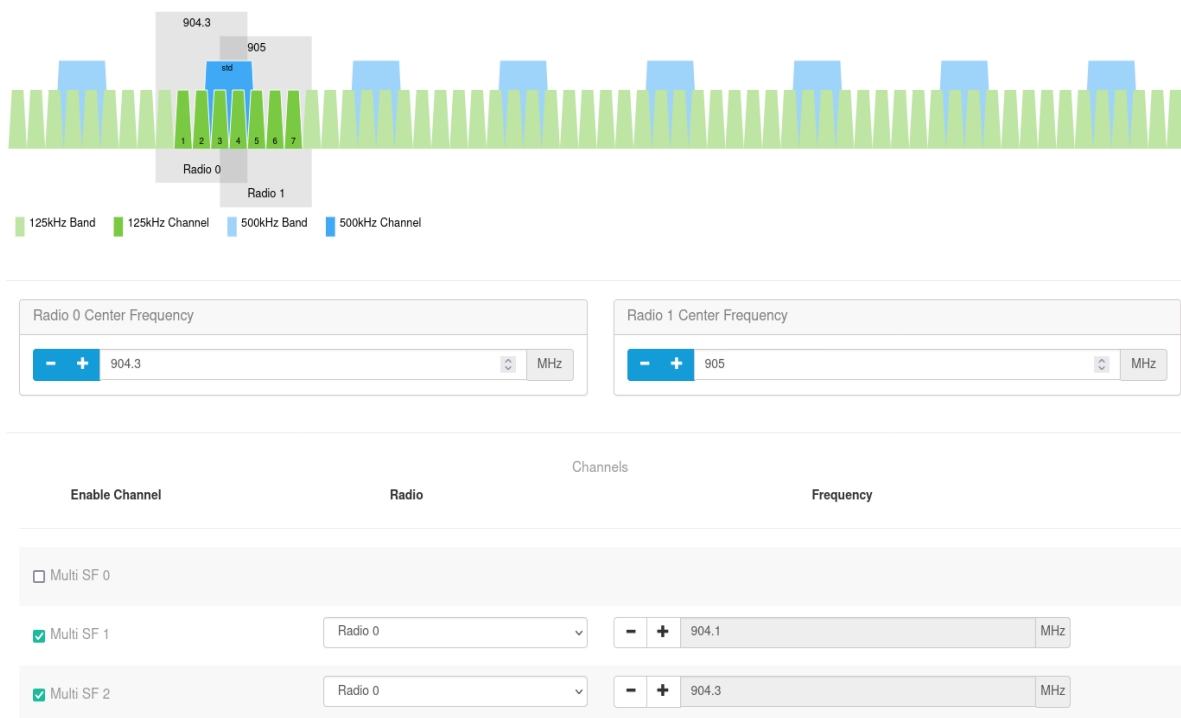


Figura 41. *ScreenShot* da configuração dos canais de frequências do Gateway Laird 915.

Essa configuração foi realizada para garantir a entrega das mensagens do repetidor, pois não foi possível encontrar um local adequado no qual os end-devices não conseguissem enviar seus dados para o gateway e somente fossem recebidos pelo repetidor. Como os dispositivos (*r-node*, end-devices e gateway) estavam localizados dentro de algumas residências em São Jorge, o alcance máximo de recepção do gateway foi de 560 m. Já o repetidor, por possuir uma antena de baixa qualidade, a sensibilidade de recebimento diminuiu. Esses fatores são explicados pelo ambiente urbano onde os dispositivos

estavam inseridos, pois o sinal é enfraquecido pelo material em que ocorreu a propagação. Na Figura 42, é possível analisar que materiais como concreto e paredes de tijolos são obstáculos que enfraqueceram severamente o sinal.

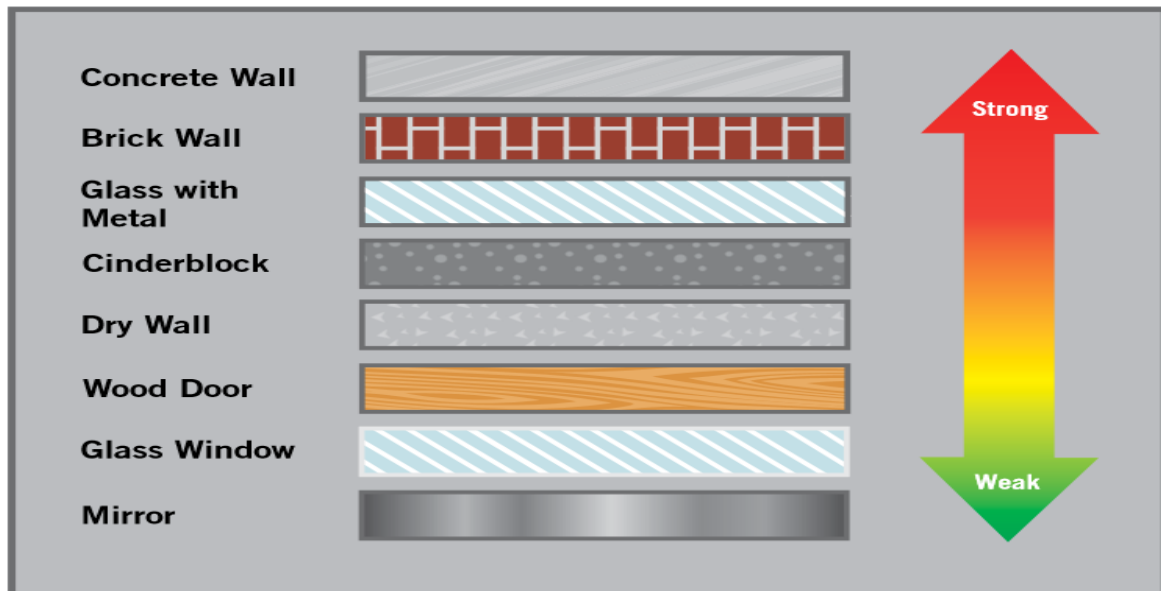


Figura 42. Alguns materiais e sua influência na propagação do sinal. Quanto mais forte for o material mais fraco é o sinal [56].

Além dos obstáculos em que o sinal se propaga, a alimentação realizada nos dispositivos, por meio de um cabo conectado na entrada USB dos dispositivos repetidores, Arduino Nano, ocasionou o enfraquecimento da potência de transmissão dos rádios. A corrente mínima para um bom funcionamento do dispositivo deve ser por meio de uma fonte externa que fornece 120 mA e uma tensão de 3,3 V. [57]. Porém, essas informações foram obtidas posteriormente aos estudos realizados, assim, foram mantidos os resultados obtidos.

A rede LoRaWAN com repetidor utilizou as frequências padrões do plano US915 e o fator de espalhamento 9. As configurações de envio dos end-devices é a mesma que a de recebimento do dispositivo repetidor, assim como a configuração de *downlink* entre gateway, repetidor, e repetidor e end-device. Para o repetidor utilizou-se uma frequência diferente de envio de *uplink* em relação aos end-devices, assim garantindo que todas as mensagens recebidas pelo *Network Server* fossem enviadas exclusivamente pelo *r-node*.

Foi utilizado a frequência de espalhamento 9 pois foi a configuração que apresentou melhores resultados na entrega das mensagens. Alguns estudos foram realizados com o SF 10, mas nem todas as mensagens enviadas pelos end-devices o *r-node* era capaz de recebê-las. Nos estudos realizados com o SF menor que 9, o alcance observado não passou de algumas dezenas de metros.

4.2 ESTUDOS COM *R-NODE*

Os estudos de caso abordaram diferentes configurações do dispositivo repetidor inserido em uma rede LoRaWAN. O primeiro estudo realizado buscou comprovar se o *r-node* foi capaz de retransmitir mensagens LoRaWAN. No segundo, foi realizado o estudo com dois repetidores, mas um responsável somente para mensagens *uplink* e o outro para mensagens *downlink*. No terceiro estudo, dois dispositivos repetidores foram colocados entre os end-devices e o gateway para verificar a possibilidade de múltiplos saltos utilizando os *r-nodes*.

Os estudos foram realizados com os dispositivos localizados no interior de algumas casas no município de São Jorge, a comunicação entre os elementos da rede (gateway, end-devices e repetidor) precisou estar em distâncias menores para que fosse possível enviar os pacotes. Isso foi comprovado pelo fato de que mensagens *downlink* não eram retransmitidas pelo *r-node* com o RSSI menor que -115. Esse fator indica a força/intensidade do sinal recebido, quanto menor, pior é a qualidade do sinal.

Na Figura 43, são apresentadas as três configurações de rede que foram utilizadas para a realização dos estudos. O retângulo (A) é a configuração de rede utilizada no estudo em que o *r-node* opera com o envio e recebimento de mensagens *uplink* e *downlink*. O retângulo (B) foi utilizado no estudo com dois *r-nodes* com funções distintas, um operando apenas com mensagens *uplink* e o outro apenas com mensagens *downlink*. Por fim, o último estudo, retângulo (C), foi a inserção de dois *r-nodes* conectados sequencialmente. As comunicações entre os elementos da rede são representadas por setas, na qual, as setas em vermelho indicam falta de comunicação e as verdes conexões, estáveis e de alta qualidade entre os dispositivos.

4.2.1 *r-node* operando com *downlink* e *uplink*

Neste estudo, foi inserido um dispositivo repetidor entre os end-devices e o gateway (Figura 43) retângulo vermelho (A). Para a realização desse estudo foram feitas duas abordagens, na qual a primeira utilizou-se três end-devices e na segunda dois end-devices. Os dados foram enviados em intervalos de tempos diferentes para que não houvesse colisão de pacotes, pois o *r-node* é capaz de enviar apenas uma mensagem por vez. Para testar a efetividade do repetidor, o canal de comunicação (frequência de comunicação) entre end-device e gateway foi suspensa, assim, simulando um ambiente sem comunicação.

A disposição dos dispositivos para este estudo realizou-se da seguinte forma (Figura 44). Os end-devices ficaram a 240 m do repetidor e o repetidor ficou a 240 m do gateway, mas o end-devices e o gateway não possuíam comunicação.

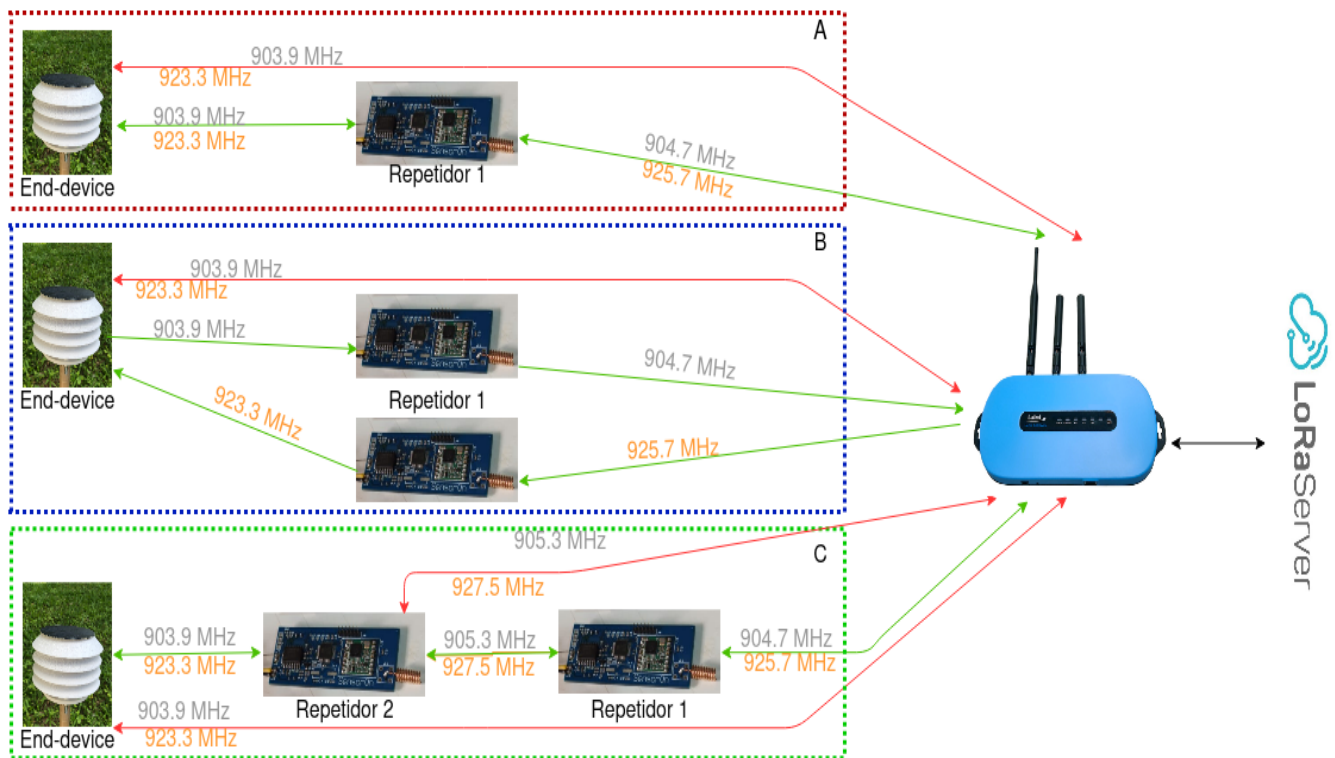


Figura 43. Arquiteturas dos estudos com diferentes frequências para simular ausência de alcance e uso dos repetidores. As frequências alaranjadas são correspondentes às frequências de *downlink* e as escritas em cinza de *uplink*. Linhas vermelhas representam conexão inexistente e linhas verdes, conexões estáveis e de alta qualidade. O retângulo vermelho (A) representa uma rede LoRaWAN com um repetidor, o azul (B) é uma rede com dois repetidores, mas cada um responsável pelo envio de um tipo de mensagem (*uplink* ou *downlink*) e o retângulo verde (C) representa a rede com dois repetidores.

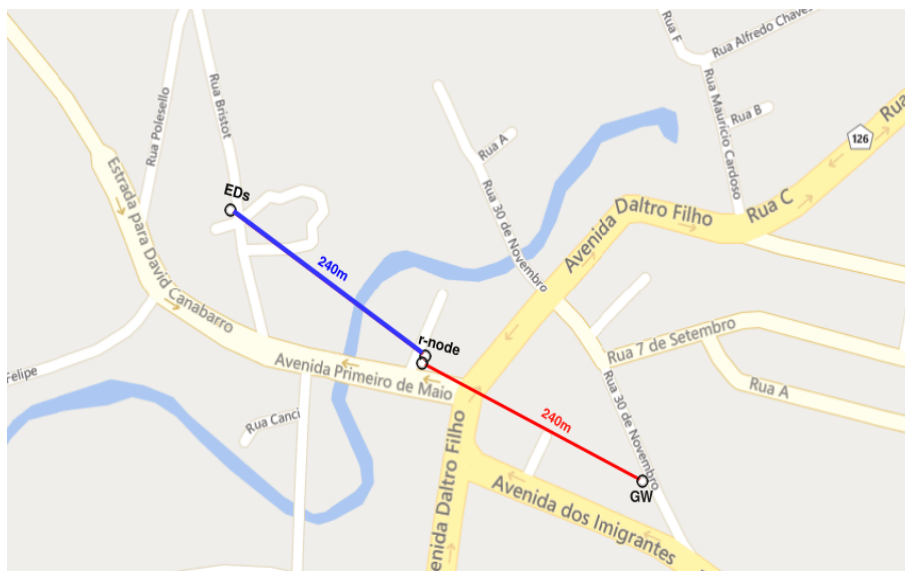


Figura 44. Disposição dos dispositivos para a realização do primeiro estudo.

O estudo realizado com três EDs totalizou 580 mensagens enviadas e 27 perdidas, com uma porcentagem de perda de 4,65% para mensagens *uplink*. Para *downlink* 18

mensagens foram enviadas e 1 perdida, com porcentagem de 3,7%. O estudo realizado com dois EDs enviou 587 mensagens com 4,25% das mensagens perdidas, em um total de 25 das mensagens não entregues. Em relação às mensagens *downlink*, neste estudo, apresentou maior taxa de perda de pacotes, o *r-node* conseguiu enviar 4 de 10 pacotes recebidos. Essa maior taxa de perda deve ter ocorrido devido às condições climáticas, chuva, nos dias em que foram realizados os estudos. O efeito da chuva é um fator que afeta a atenuação de sinais propagados [58].

4.2.2 Estudo com *r-nodes* operando separadamente com um tipo de mensagem: *downlink* ou *uplink*

Após a análise de comportamento realizada no primeiro estudo verificou-se que ocorreram colisões de pacotes devido ao funcionamento do repetidor, pois o *r-node* é capaz de trabalhar com uma mensagem de cada vez. Devido a isso, foram colocados dois dispositivos repetidores no mesmo local (Figura 45), mas com funcionalidades diferentes, Seção 3.3.2. A rede foi organizada exatamente como a do primeiro estudo para que fosse possível realizar a comparação de pacotes perdidos (Figura 44).

Para este estudo, realizou-se a configuração de repetidores (Figura 43, retângulo (B)) um responsável por mensagens *uplink* e outro por mensagens *downlink*. A distância entre os dispositivos permaneceu a mesma e a quantidade de pacotes enviados ficou próximo do realizado no primeiro estudo com dois EDs.

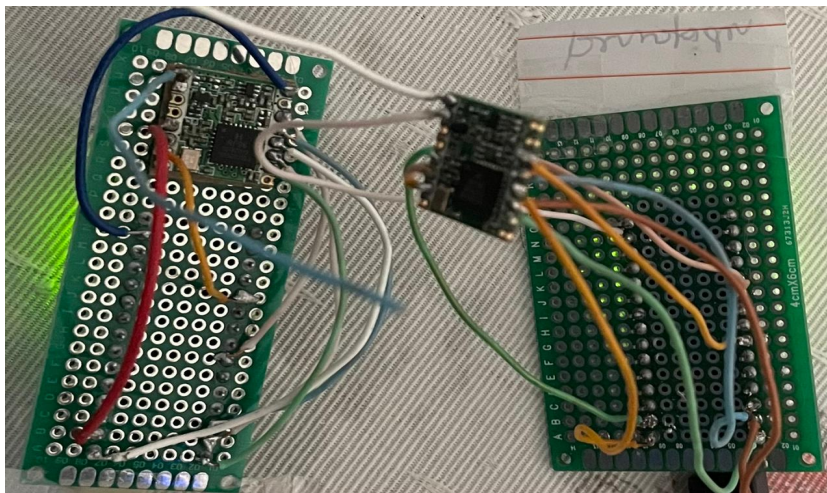


Figura 45. Dispositivos de retransmissão de mensagens *uplink* e *downlink*.

O estudo, portanto, contou com o envio de 592 mensagens. A perda total de pacotes foi de 21, com uma porcentagem de 3,54%. Foram enviados 12 *downlinks*, com um pacote perdido.

4.2.3 Estudo com dois *r-nodes* sequencialmente

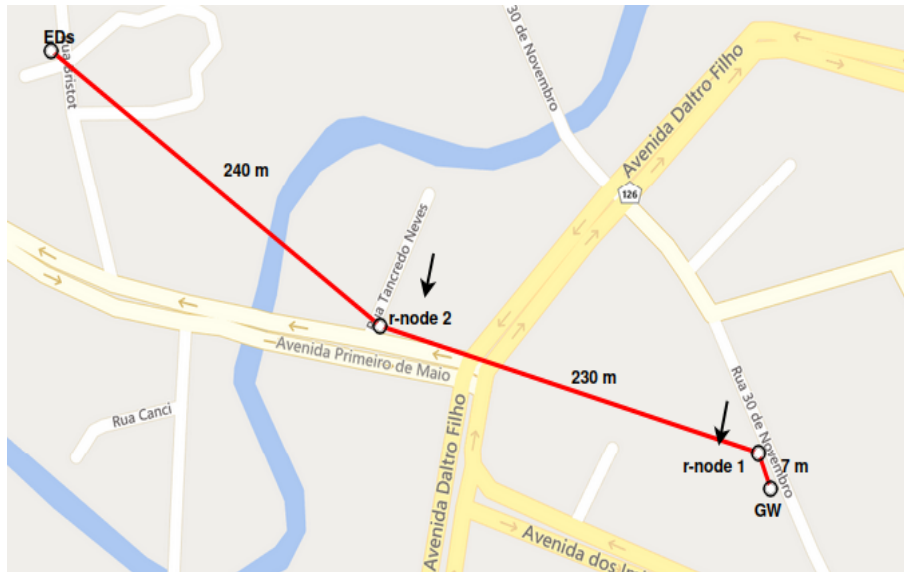


Figura 46. Rede com dois dispositivos repetidores conectados sequencialmente.

Este estudo consistiu na utilização de dois repetidores, fazendo as funções de *uplink* e *downlink*, ligados sequencialmente. Foi testado apenas a funcionalidade dessa organização de rede, pois em alguns casos somente um repetidor não terá o alcance necessário para que as mensagens possam chegar até o gateway.

Na Figura 46, os EDs estão localizados a 240 m do *r-node 2*. O *r-node 2* está a 230 m do *r-node 1* que por fim, está a 7 m do gateway. Os dispositivos foram organizados dessa forma para tentar manter o padrão nas distâncias de comunicação em relação aos outros estudos.

Para o envio das mensagens *uplink*, devido ao problema de comunicação, os dispositivos foram configurados como relatado na Seção 4.1. O diferencial para realizar esse estudo foi a configuração das frequências do gateway, para que o *Network Server* fosse capaz de receber somente mensagens do *r-node 1*, assim, foram desativadas as frequências dos ED's e a frequência do *r-node 2*.

Na Figura 43, as conexões em vermelho representam a falta de conectividade entre os elementos da rede. Enquanto as verdes são os dispositivos que possuem conectividade. As conexões em cinza representam às frequências das mensagens *uplink* e as laranjas são as frequências de *downlink*. Para a rede com dois repetidores, foi necessário a desativação das frequências no gateway, tanto a dos EDs como a do Repetidor 2, para garantir o recebimento das mensagens enviadas pelo Repetidor 1 ao LoRa Server. Em ambas as mensagens, *uplink* e *downlink*, obteve-se sucesso na entrega.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

As redes de coletas de dados e transmissão estão cada vez mais presentes na coleta dos mais variados dados em diferentes contextos de utilização. Na agricultura, o uso da Internet das Coisas permite a obtenção de melhores rendimentos, aumentando a eficiência produtiva, assim, ajudando no problema gerado pela expansão populacional. LoRaWAN, apesar da baixa taxa de transmissão de dados, é considerada a rede mais adequada para LPWANs em aplicações IoT na agricultura. Porém, problemas de comunicação em áreas remotas e difícil acesso são encontradas em algumas propriedades agrícolas. Problemas como relevo acentuado e isolamento de dispositivos coletores de dados impedem a utilização dessa tecnologia.

Sendo assim, por meio desse trabalho, foi possível desenvolver um dispositivo, *r-node*, transparente para a rede LoRaWAN, capaz de retransmitir as mensagens e aumentar o alcance da rede. O repetidor desenvolvido conseguiu retransmitir tanto mensagens *uplink* como mensagens *downlink* nas duas janelas de tempo padrões para dispositivos end-devices LoRaWAN. Devido a característica do *r-node* de poder trabalhar com apenas uma mensagem de cada vez, foi possível observar que adicionando um end-device aumentou a perda de pacotes, *uplink*. Esse aumento foi gerado, devido a maior colisão de pacotes na hora do recebimento pelo repetidor.

Ao evidenciar esse problema gerado pela colisão, um novo algoritmo foi desenvolvido para que o *r-node* pudesse trabalhar apenas com um tipo de mensagem, *uplink* ou *downlink*. Assim, após a configuração dos dispositivos, cada qual responsável por um tipo de mensagens, foi possível concluir que houve uma redução da perda de pacotes *uplink* de 4,25% para 3,54%, no teste com dois end-devices.

O presente trabalho mostrou a possibilidade de inserir dois dispositivos repetidores (*r-node*) na rede LoRaWAN. O teste realizado levou em consideração apenas se foi ou não possível enviar dados com dois *r-nodes* presentes na rede. Tanto mensagens *uplink* como mensagens *downlink* foram possíveis ser retransmitidas, assim, podendo aumentar ainda mais o alcance da rede.

Como trabalho futuro, propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo visando a eficiência energética, assim, podendo funcionar com baterias e flexibilizando sua utilização. Esse dispositivo fará a utilização de um componente controlador de tempo para poder armazenar os horários em que as mensagens foram enviadas pelos end-devices e recebidas pelo *r-node*. Desse modo, torna-se viável a utilização do repetidor em áreas agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

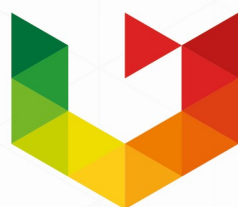
- [1] DALLAGASPERINA, R. W. *Uma plataforma de comunicação universal utilizando protocolo Zigbee*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, Brasil, 2017. Disponível em: <<http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/27>>.
- [2] ANALYTICS, I. *State of the IoT 2020: 12 billion IoT connections, surpassing non-IoT for the first time*. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>>. Acesso em: Fev. 05, 2022.
- [3] ANALYTICS, I. *State of IoT 2021: Number of connected IoT devices growing 9% to 12.3 billion globally, cellular IoT now surpassing 2 billion*. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>>. Acesso em: Fev. 05, 2022.
- [4] DAVCEV, D. et al. IoT agriculture system based on LoRaWAN. In: *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS*. [S.l.: s.n.], 2018. ISBN 9781538610664.
- [5] MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 2019. ISSN 24059595.
- [6] CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M. *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. [S.l.]: Academic Press, 2020.
- [7] RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *ieee communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.
- [8] SONG, Y. et al. An internet of energy things based on wireless lpwan. *Engineering*, Elsevier, v. 3, n. 4, p. 460–466, 2017.
- [9] NORDLÖF, J.; LAGUSSON, P. *A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard*. [S.l.], 2017. 84 p.
- [10] GADDAM, S. C.; RAI, M. K. A comparative study on various LPWAN and cellular communication technologies for IoT based smart applications. In: *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research, ICETIETR 2018*. [S.l.: s.n.], 2018. ISBN 9781538657447.
- [11] HAXHIBEQIRI, J. et al. Lora indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study. In: IEEE. *2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*. [S.l.], 2017. p. 1–8.
- [12] DAVCEV, D. et al. lot agriculture system based on lorawan. In: *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.

- [13] MAGRO, S. Z. D. et al. *Sensoriamento remoto utilizando protocolo de comunicação LoRaWAN*. 1–13 p. Graduação — Curso de Engenharia de Computação, Universidade de Passo Fundo, 2019.
- [14] YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.
- [15] ANTONY, A. P. et al. *A review of practice and implementation of the internet of things (IoT) for smallholder agriculture*. 2020.
- [16] AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.
- [17] ČISAR, P. et al. Teaching spread spectrum in the course telecommunication systems using octave. *Computer Applications in Engineering Education*, Wiley Online Library, v. 28, n. 2, p. 367–383, 2020.
- [18] Eric B. *LoRa*. Disponível em: <<https://lora.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: Fev. 23, 2022.
- [19] ADI, P. D. P.; KITAGAWA, A. A study of lora performance in monitoring of patient's spo2 and heart rate based iot. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, v. 11, n. 2, p. 238–251, 2020.
- [20] BEMBE, M. et al. A survey on low-power wide area networks for iot applications. *Telecommunication Systems*, Springer, v. 71, n. 2, p. 249–274, 2019.
- [21] LAVRIC, A.; PETRARIU, A. I.; POPA, V. Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 35816–35825, 2019.
- [22] GROUP, W. *WND BRazil*. Disponível em: <<https://www.wndgroup.io/brasil/>>. Acesso em: Out. 22, 2021.
- [23] SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S.-H. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. *Ict Express*, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017.
- [24] RATASUK, R. et al. Nb-iot system for m2m communication. In: IEEE. *2016 IEEE wireless communications and networking conference*. [S.l.], 2016. p. 1–5.
- [25] The Things Network. *LoRaWAN Overview*. 2018. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/end-devices>>.
- [26] ALMEIDA, J. V. P. D.; TEIXEIRA, G. B. *REDE LORA @ E PROTOCOLO LORAWAN @ APLICADOS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO NO BRASIL*. Ponta Grossa, 2017. 76 p.
- [27] Orange. *LoRa Device Developer Guide Orange Connected Objects & Partnerships*. [S.l.], 2016. 41 p.

- [28] LIANDO, J. C. et al. Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM New York, NY, USA, v. 15, n. 2, p. 1–35, 2019.
- [29] HAXHIBEQIRI, J. et al. *A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application*. [S.l.]: MDPI AG, 2018.
- [30] NETO, E. D. S. *Gateways LoRa: soluções open-source hardware*. 2018. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/gateways-lora-open-source-hardware/>>.
- [31] NEWIEVENTURES. *LoRaWAN: OTAA or ABP?* Disponível em: <<https://www.newieventures.com.au/archived-news-insights/2018/2/26/lorawan-otaa-or-abp>>. Acesso em: Nov. 04, 2021.
- [32] ALLIANCE, L. *LoRaWAN™ 1.0.3 Regional Parameters*. Disponível em: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.3rev0.pdf>. Acesso em: Nov.09, 2021.
- [33] KUFAKUNESU, R.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. A survey on adaptive data rate optimization in lorawan: Recent solutions and major challenges. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 18, p. 5044, 2020.
- [34] NETWORK, T. T. *Regional Parameters*. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>>. Acesso em: Nov. 09, 2021.
- [35] MENDES, A. S. et al. Multi-agent approach using lorawan devices: An airport case study. *Electronics*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 9, p. 1430, 2020.
- [36] BANKOV, D.; KHOROV, E.; LYAKHOV, A. On the limits of lorawan channel access. In: IEEE. *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*. [S.l.], 2016. p. 10–14.
- [37] Microchip. *megaAVR® Data Sheet*. 653 p. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>>. Acesso em: Out. 02, 2020.
- [38] ELECTRONICS, C. *Board, Nano V3.0*. Disponível em: <<https://core-electronics.com.au/nano-v3-0-board.html>>.
- [39] Hope. *RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module*. 121 p. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf>. Acesso em: Out.31, 2020.

- [40] INTEGRATED, M. *DS3231*. 20 p. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>>. Acesso em: Nov. 02, 2020.
- [41] FilipeFlop. *Real Time Clock RTC DS3231*. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/real-time-clock-rtc-ds3231/?gclid=CjwKCAjwiaX8BRBZEiwAQQxGx50jAuiQgVRSnOfM-Bzp52vwZNqSrZUi9CY31K0OXjVmT2KP2eo-PhoCeCAQAvD_{BwE}>>>. Acesso em: Nov.02, 2020.
- [42] Sensirion. *Datasheet SHT20*. 2014. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/756285/ETC2/SHT20.html>>. Acesso em: Nov. 02, 2020.
- [43] DIOP, M.; PHAM, C. Increased flexibility in long-range IoT deployments with transparent and light-weight 2-hop LoRa approach. In: *IFIP Wireless Days*. [S.l.: s.n.], 2019. ISBN 9781728101170. ISSN 2156972X.
- [44] DIAS, J.; GRILLO, A. LoRaWAN multi-hop uplink extension. In: *Procedia Computer Science*. [S.l.]: Elsevier B.V., 2018. v. 130, p. 424–431. ISSN 18770509.
- [45] MAZIERO, L. et al. Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/553/2020/07/91663-field_{submission}_abstract_{file}2.pdf>>. Acesso em: Nov.09, 2021.
- [46] SISINNI, E. et al. LoRaWAN Range Extender for Industrial IoT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 16, n. 8, 2020. ISSN 19410050.
- [47] Sparkfun. *RFM69HCW Hookup Guide*. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/rfm69hwc-hookup-guide/the-antenna>>. Acesso em: Fev. 23, 2022.
- [48] Itech. *Gateway LoRa Laird*. Disponível em: <<https://grupoitech.com.br/componentes-eletronicos/gateway-lora-laird/>>. Acesso em: Dez. 14, 2021.
- [49] PlatformIO. *What is PlatformIO?* Disponível em: <<https://docs.platformio.org/en/latest/what-is-platformio.html>>. Acesso em: Out. 01, 2020.
- [50] The Things Network. *Learn*. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/>>. Acesso em: Out. 05, 2020.
- [51] Cayenne. *LoRa*. Disponível em: <<http://mydevices.com/cayenne/docs/lora/>>.

- [52] Cayenne. *Cayenne Low Power Payload*. 2018. Disponível em: <<https://mydevices.com/cayenne/docs/lora/lora-cayenne-low-power-payload-data-types>>. Acesso em: Out. 05, 2020.
- [53] LMiC. *IBM LoRaWAN in C (LMiC)*. 2015. Disponível em: <<https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic/blob/master/doc/LMiC-v1.5.pdf>>. Acesso em: Out. 02, 2020.
- [54] LMiC. *Arduino LoRaWAN MAC in C (LMiC)*. 2018. Disponível em: <<https://github.com/mcci-catena/arduino-lmic/blob/master/doc/LMiC-v3.0.99.pdf>>. Acesso em: Out. 02, 2020.
- [55] ricaun. *LoRaWanPacket*. Disponível em: <<https://github.com/ricaun/LoRaWanPacket>>. Acesso em: Nov. 18, 2021.
- [56] xmartO. *How Obstacles Affect Your Signal Strength*. Disponível em: <<https://www.xmarto.com/helpcenter/index.php?action=artikelcat=1id=8artlang=en>>. Acesso em: Nov. 27, 2021.
- [57] sandeepmistry. *Arduino LoRa*. Disponível em: <<https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>>. Acesso em: Fev. 23, 2022.
- [58] ELIJAH, O. et al. Effect of weather condition on lora iot communication technology in a tropical region: Malaysia. *IEEE Access*, v. 9, p. 72835–72843, 2021.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br