

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucas Maziero

**PROJETO DE UM NÓ LORAWAN HÍBRIDO COM REPETIDOR
EMBUTIDO DE BAIXO CUSTO E BAIXO CONSUMO DE ENERGIA**

Santa Maria, RS
2020

Lucas Maziero

PROJETO DE UM NÓ LORAWAN HÍBRIDO COM REPETIDOR EMBUTIDO DE BAIXO CUSTO E BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Carlos Henrique Barriquello

COORIENTADOR: Prof. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS
2020

Maziero, Lucas
PROJETO DE UM NÓ LORAWAN HÍBRIDO COM REPETIDOR
EMBUTIDO DE BAIXO CUSTO E BAIXO CONSUMO DE ENERGIA /
Lucas Maziero.- 2020.
85 p.; 30 cm

Orientador: Carlos Henrique Barriquello
Coorientador: Tiago Bandeira Marchesan
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2020

1. Nó LoRaWAN Híbrido 2. Internet das Coisas (IoT) 3.
LoRa 4. LoRaWAN 5. Taxa de Entrega de Pacotes I.
Henrique Barriquello, Carlos II. Bandeira Marchesan,
Tiago III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Lucas Maziero. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Professor Robert Ritter, n. 6484

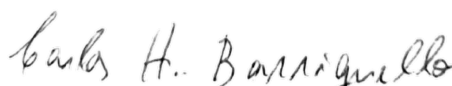
Fone (0xx) 55 98445 6900; End. Eletr.: lucas.mazie.ro@hotmail.com

Lucas Maziero

PROJETO DE UM NÓ LORAWAN HÍBRIDO COM REPETIDOR EMBUTIDO DE BAIXO CUSTO E BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

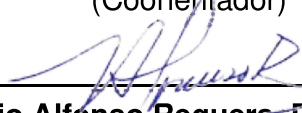
Aprovado em 23 de setembro de 2020:



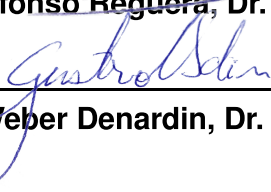
Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Coorientador)



Vitalio Alfonso Reguera, Dr. (UFSM)



Gustavo Weber Denardin, Dr. (UTFPR)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial ao meus pais, Dalirio Maziero e Bernardete Maziero, e minha irmã Michele Maziero por todo carinho e amor, pela educação e incentivo, por sempre acreditarem em meu potencial, tornando todo este trabalho possível.

Agradeço aos professores Carlos Henrique Barriquello e Tiago Bandeira Marchesan, pela orientação, apoio e confiança dedicados ao longo este trabalho.

Agradeço ao time Fox IoT, principalmente aos Engenheiros Filipe Carloto e Leonardo Adam, que muito contribuíram profissionalmente nesse trabalho.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, por me proporcionar essa oportunidade da realização do mestrado.

Agradeço a minha namorada Luara Medianeira Schlösser de Lima, que esteve sempre ao meu lado me apoiando e acreditando que tudo isso seria possível.

Ao apoio técnico e financeiro da RGE Sul (Grupo CPFL Energia) referente ao projeto intitulado Soluções Inovadoras de Eficiência Energética e Minigeração em Instituição Pública Federal de Ensino Superior: Uma abordagem na UFSM (P&D/ANEEL).

Agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

Para finalizar, quero agradecer a todos que direta ou indiretamente fizeram parte disso, o meu muito sincero muito obrigado.

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim, último, melhorar a humanidade.

(Nikola Tesla)

RESUMO

PROJETO DE UM NÓ LORAWAN HÍBRIDO COM REPETIDOR EMBUTIDO DE BAIXO CUSTO E BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

AUTOR: Lucas Maziero

ORIENTADOR: Carlos Henrique Barriuello

COORDENADOR: Tiago Bandeira Marchesan

A Internet das Coisas (IoT) é um tema vem crescendo muito, com isso as redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) vem ganhando espaço no mercado de telecomunicações. Nesse mercado relacionado a IoT a tecnologia LoRa vem se destacando, justamente por ter as características desejadas a um dispositivo IoT que é, comunicação sem fio a longas distâncias com um baixo consumo de energia, o que viabiliza o uso de baterias por um longo período. O protocolo LoRaWAN foi projetado para Internet das Coisas, utilizando a modulação LoRa como meio físico de comunicação e provendo segurança a rede, já que os dados que ali trafegam são criptografados. Nesse trabalho é proposto o desenvolvimento de um Nó LoRaWAN Híbrido que inclui um Nó LoRaWAN Básico e um Repetidor LoRaWAN embutidos no mesmo dispositivo, assim, além de funcionar como um dispositivo LoRaWAN clássico, esse tem a capacidade de repetir pacotes LoRaWAN de forma totalmente transparente na rede. Os resultados obtidos mostram que adicionando o Nó LoRaWAN Híbrido na rede LoRaWAN tem-se um aumento significativo na taxa de entrega de pacotes, e também possibilitando o aumento da cobertura, mitigando custos e aumentando a confiabilidade da rede LoRaWAN.

Palavras-chave: Nó LoRaWAN Híbrido. Internet das Coisas (IoT). LoRa. LoRaWAN. Taxa de Entrega de Pacotes.

ABSTRACT

PROJECT OF A HYBRID LORAWAN NODE WITH EMBEDDED REPEATER WITH LOW COST AND LOW POWER CONSUMPTION

AUTHOR: Lucas Maziero
ADVISOR: Carlos Henrique Barriquello
CO-ADVISOR: Tiago Bandeira Marchesan

The Internet of Things (IoT) is a theme that has grown a lot, with this the LPWAN (Low Power Wide Area Network) has gained space in the telecommunications market. In this market related to IoT, the LoRa technology has been standing out, precisely because it has the desired characteristics of an IoT device which is, wireless communication over long distances with low power consumption, which enables the use of batteries for a long period. The LoRaWAN protocol was designed for the Internet of Things, using LoRa modulation as a physical means of communication and providing network security, since the data that travel there are encrypted. This work proposes the development of a Hybrid LoRaWAN Node that includes a Basic LoRaWAN Node and a LoRaWAN Repeater embedded in the same device, thus, besides working as a classic LoRaWAN device with LoRaWAN packet repeater capability in a totally transparent way in the LoRaWAN network. The results show that adding the Hybrid LoRaWAN Node to the LoRaWAN network significantly increases the packet delivery rate, as well as increasing coverage, mitigating costs and increasing the reliability of the LoRaWAN network.

Keywords: Hybrid LoRaWAN node. Internet of Things. LoRa. LoRaWAN. Packet Delivery Rate

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Arquitetura da rede LoRaWAN com a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN.	14
Figura 2.1 – Comparativo entre LPWAN e outras tecnologias.	16
Figura 2.2 – Frequências abertas normalmente utilizadas no LoRa.	17
Figura 2.3 – Modulação LoRa CSS (<i>Chirp Spread Spectrum</i>).	18
Figura 2.4 – Cálculo de enlace para uma LPWAN.	19
Figura 2.5 – Comparação dos diferentes fatores de espalhamento: SF 7 ao SF 12.	20
Figura 2.6 – Comparação das diferentes larguras de bandas.	22
Figura 2.7 – Divisão das camadas do protocolo LoRaWAN.	23
Figura 2.8 – Visão geral dos componentes básicos da LoRaWAN.	24
Figura 2.9 – Modem LoRaWAN RHF3M076 (Dispositivo Final).	25
Figura 2.10 – Módulos básicos que compõem um dispositivo final LoRaWAN genérico.	25
Figura 2.11 – Gateway LoRaWAN.	26
Figura 2.12 – Arquitetura da rede LoRaWAN.	28
Figura 2.13 – Funcionamento das Classes A, B e C LoRaWAN.	29
Figura 2.14 – Comparativo das classes LoRaWAN.	30
Figura 2.15 – Processo de criptografia do <i>payload</i> .	31
Figura 2.16 – Processo de criação do MIC.	31
Figura 2.17 – Processo de autenticação por ABP.	32
Figura 2.18 – Processo de autenticação por OTAA.	33
Figura 2.19 – Diagrama de canais <i>uplink</i> e <i>downlink</i> no padrão da Austrália.	34
Figura 3.1 – Topologia de rede RPL.	37
Figura 3.2 – Sequência de controle do sleep dos dispositivos finais.	38
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do nó final.	39
Figura 3.4 – Gráfico de uma rede (nós e gateways).	40
Figura 3.5 – Caminho mais curto de todos os nós para o gateway	41
Figura 3.6 – Diagrama proposto pelos desenvolvedores do e-node.	42
Figura 3.7 – Formato do pacote de dados.	43
Figura 3.8 – Topologia de rede das experiências em laboratório.	44
Figura 3.9 – Diagrama de sequência com perda de pacotes.	45
Figura 4.1 – Ambiente de desenvolvimento VSCode + PlatformIO IDE.	48
Figura 4.2 – Arquitetura do microcontrolador ATmega328P (AVR).	50
Figura 4.3 – Zona de operação segura do microcontrolador ATmega328P.	51
Figura 4.4 – Diagrama de funcionamento do ATmega328p com RFM95 no barramento SPI.	52
Figura 4.5 – Sensor de temperatura DS18B20.	53
Figura 4.6 – Saída digital e indicador de acionamento.	54
Figura 4.7 – Bateria de Li-Po 3,7 V 1000 mAh.	55
Figura 4.8 – Diagrama de radiação polar da antena utilizada (Horizontal e Vertical).	56
Figura 4.9 – Diagrama Esquemático Completo do Nó Híbrido LoRaWAN.	57
Figura 4.10 – Placa de Circuito Impresso 3D do Nó Híbrido LoRaWAN.	58
Figura 4.11 – Fluxograma do processo do Nó LoRaWAN Básico (Parte do Nó Híbrido LoRaWAN).	60
Figura 4.12 – Estrutura das camadas do frame LoRa: Physical Layer, MAC Layer e Application Layer.	61
Figura 4.13 – Fluxograma do processo do Repetidor LoRaWAN (Parte do Nó Híbrido	

LoRaWAN).	63
Figura 4.14 – Placa PCI e periféricos do Nó Híbrido LoRaWAN	64
Figura 4.15 – Nó Híbrido LoRaWAN.	65
Figura 4.16 – Estrutura do Pacote de Acionamento da Saída Digital.	68
Figura 4.17 – Estrutura do Pacote de configuração do Nó LoRaWAN Básico.	68
Figura 4.18 – Estrutura do Pacote que Ativa o Modo Scanner do Repetidor LoRaWAN.	69
Figura 4.19 – Estrutura do Pacote de Configuração dos Parâmetros do Repetidor LoRaWAN.	69
Figura 5.1 – Mapa da localização dos medidores eletrônicos de energia elétrica (pontos azuis) e gateways (pontos amarelos) da UFSM.	70
Figura 5.2 – Taxa de entrega do medidor sm15 antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.	71
Figura 5.3 – Estrutura do primeiro experimento com o medidor de energia sm15.	72
Figura 5.4 – Taxa de entrega do medidor sm15 após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.	73
Figura 5.5 – Curva de descarga da bateria de <i>backup</i> ao longo do primeiro experimento.	73
Figura 5.6 – Taxa de entrega dos medidores sm15 e sm38 antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.	74
Figura 5.7 – Estrutura do segundo experimento com os medidores de energia sm15 e sm38.	75
Figura 5.8 – Taxa de entrega dos medidores sm15 e sm38 após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.	76
Figura 5.9 – Curva de descarga da bateria de <i>backup</i> ao longo do segundo experimento.	76
Figura 5.10 – Gráfico de temperatura e taxa de entrega de pacotes ao longo de 7 dias.	77
Figura 5.11 – Gráfico de nível de bateria ao longo de 7 dias.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre fator de espalhamento e largura de banda de cada e <i>payload</i> máximo <i>data rate</i>	35
Tabela 4.1 – Identificador de direção do pacote LoRaWAN.	62
Tabela 4.2 – Configuração do DR com equivalência de SF e BW.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação entre diferentes <i>SFs</i> e seus impactos na rede LoRa (Considerando: $BW = 125$, $CR = 1$).	21
Quadro A.1 – Levantamento de Preços do Nó Híbrido LoRaWAN.	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	DELIMITAÇÕES	15
1.3	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	LOW POWER WIDE AREA NETWORK	16
2.2	TECNOLOGIA LORA	17
2.2.1	Modulação LoRa	18
2.2.2	Fator de Espalhamento	19
2.2.3	Largura de Banda	21
2.3	LORAWAN	22
2.3.1	Componentes Básicos da Rede LoRaWAN	23
2.3.1.1	<i>Dispositivos Finais</i>	24
2.3.1.2	<i>Gateways</i>	25
2.3.1.3	<i>Servidor de Rede</i>	26
2.3.1.4	<i>Servidor de Aplicação</i>	27
2.3.2	Arquitetura da Rede LoRaWAN	27
2.3.3	Classes de Dispositivos LoRaWAN	28
2.3.4	Segurança da Rede LoRaWAN	30
2.3.5	Ativação de Dispositivos na Rede LoRaWAN	32
2.3.6	Faixa de Frequência Utilizada no Brasil e Normativa	33
3	TRABALHOS RELACIONADOS	36
3.1	PROPOSTAS PARA MELHORIA DA TAXA DE ENTREGA/CONFIABILIDADE DA REDE LORA	36
3.1.1	Proposta de Comunicações multihop RPL baseadas em LoRa	36
3.1.2	Aprimoramento do protocolo MAC para redução de energia no LoRaWAN	38
3.2	PROPOSTAS PARA AUMENTO DA COBERTURA/ALCANCE DA REDE	39
3.2.1	Modelo analítico de uma topologia Mesh baseada na tecnologia LoRa	40
3.2.2	Nó LoRaWAN Para IoT industrial Aprimorado	41
3.3	PROPOSTAS HÍBRIDAS PARA AUMENTO DE COBERTURA E DA TAXA DE ENTREGA	42
3.3.1	Um protocolo de roteamento para redes LoRa Mesh	43
3.3.2	Melhoria da confiabilidade do LoRa com ARQ e nó de retransmissão	44
4	DESENVOLVIMENTO	47
4.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO	47
4.2	DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE	48
4.2.1	Microcontrolador Embarcado ATmega328P	49
4.2.2	Chip Transceiver LoRa RFM95	51
4.2.3	Sensor e Atuador Integrados	52
4.2.4	Bateria de Backup	54
4.2.5	Antena Externa	55
4.2.6	Diagrama Esquemático e Placa de Circuito Impresso	56
4.3	DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE EMBARCADO	58
4.3.1	Implementação do Nó LoRaWAN Básico	59
4.3.2	Implementação do Repetidor LoRaWAN	60

4.3.3	Nó Híbrido LoRaWAN Completo	63
4.3.4	Parametrização do Nó Híbrido LoRaWAN via Comandos AT's	65
4.3.5	Parametrização do Nó Híbrido através Rede LoRaWAN	67
5	RESULTADOS	70
5.1	CAMPO DE PROVA	70
5.2	TAXA DE ENTREGA DE PACOTES LORAWAN	71
5.3	ESTABILIDADE DO NÓ HÍBRIDO LORAWAN	77
5.4	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	78
6	CONCLUSÃO	80
6.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	80
6.2	PUBLICAÇÕES REALIZADAS AO DECORRER DO MESTRADO	81
6.2.1	Registro de Softwares	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXO A – LEVANTAMENTO DE PREÇOS DO NÓ HÍBRIDO LORAWAN .	85

1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) é um tema que vem sendo muito citado em pesquisas, devido ao seu grande potencial. Há uma grande tendência que todos os dispositivos se conectem entre si formando uma grande rede mundial. O IoT tem chamado a atenção não só do meio acadêmico, mas também da indústria que vem fazendo grandes investimentos para aprimorar processos e principalmente transformar dados em informação útil, para tomadas de decisão mais precisas e assertivas, procurando minimizar custos. Para leitura de informações de sensores, processos, medição de energia inteligente, de forma remota se faz necessário a utilização de redes de comunicação sem fio de longas distâncias.

Uma tecnologia que vem sendo explorada e utilizada pelo seu grande potencial, são as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). A modulação LoRa permite comunicação sem fio de longas distâncias (mais de 5 km em ambientes urbanos) com uma baixa taxa de transmissão de dados (0,3 a 50 kbps) e baixo consumo energético, o que viabiliza o uso das baterias devido ao baixo consumo dos dispositivos

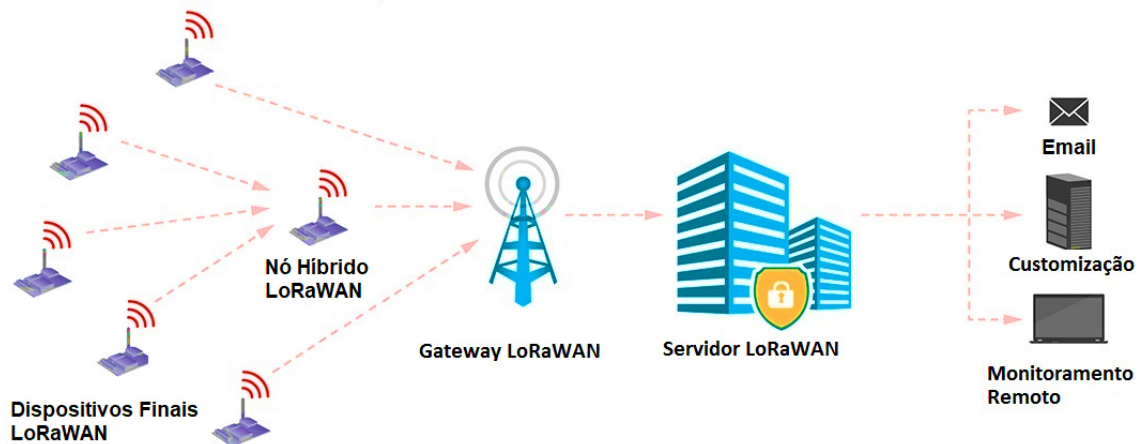
O protocolo LoRaWAN foi projetado para Internet das Coisas (IoT), utilizando a modulação LoRa. Quando se fala em IoT a segurança é um fator indispensável, sendo que esta já vem embutida no protocolo LoRaWAN, ou seja, todos os dados são criptografados de ponta a ponta, assim assegurando a privacidade da informação que trafega pela rede LoRaWAN. O dispositivo final pode ser um sensor, um medidor de consumo de energia elétrica (smart meter), hidrômetro ou outros tipos de dispositivos.

A topologia da rede LoRa se baseia num arranjo do tipo estrela, similar a uma rede WiFi ou de telefonia celular. Os dados são enviados a um elemento concentrador de dados (gateway), que por meio de uma infraestrutura de rede envia esses dados ao servidor de rede (*Network Server LoRaWAN*) via internet.

Muitas vezes o dispositivo final é instalado em locais com sombra de cobertura do sinal LoRa, dentro de caixas de metal, subsolos de prédios, vegetação densa no caminho do sinal, terrenos irregulares, esses fatores causam atenuação no sinal, podendo resultar em baixa taxa de entrega de pacotes.

Nesse trabalho é desenvolvido e proposto um Nó LoRaWAN Híbrido que contempla um Nó LoRaWAN Básico e um Repetidor LoRaWAN no mesmo dispositivo, que além de funcionar como um dispositivo LoRaWAN tem a capacidade de repetir pacotes LoRaWAN de forma totalmente transparente na rede LoRaWAN. A arquitetura da rede LoRaWAN com a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN é apresentada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Arquitetura da rede LoRaWAN com a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN.



Fonte: Autor.

O Nó LoRaWAN Híbrido é normalmente inserido entre o dispositivo final e o concentrador (gateway) a fim de melhorar o alcance e a qualidade da comunicação LoRa. Proporcionando a cobertura de áreas onde o sinal chega com baixa potência. Também é possível estender a rede LoRaWAN sem a necessidade de inserir um novo concentrador na rede. Visto que o concentrador é o elemento mais caro da infraestrutura de comunicação, assim, o uso de um repetidor muitas vezes se torna viável e com ótimo custo benefício.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é implementar um dispositivo LoRaWAN que funcione como um Nó LoRaWAN, mas com capacidade de repetir pacotes LoRaWAN, que seja configurável e de baixo custo. Para atingir este objetivo, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Desenvolver a pilha LoRaWAN sobre a modulação LoRa, pois, assim, se tem o controle total sobre a implementação do protocolo;
- Implementar Nó LoRaWAN com capacidade de enviar e receber pacotes com confirmação (ACK) e sem confirmação (NCK);
- Implementar processo de repetição de pacotes LoRaWAN no dispositivo;
- Projeto de hardware do Nó Híbrido LoRaWAN;
- Programar o nó, de forma parametrizável, tanto localmente como pela própria rede LoRaWAN de forma simples;

- Teste de funcionamento do Nó Híbrido LoRaWAN em uma rede LoRaWAN real;
- Ao final do projeto que o Nó Híbrido LoRaWAN seja o mais próximo de um produto comercial possível.

1.2 DELIMITAÇÕES

O trabalho está delimitado ao protocolo LoRaWAN (isto é, não há outros protocolos tratados). O escopo é no projeto de um Nó Híbrido LoRaWAN com capacidade de repetição de pacotes, não opera como roteador ou gateway. Não é abordado possibilidades de interação entre repetidores. Não são abordados repetição de pacotes em multicanal (presume-se que os dispositivos finais enviam pacotes em um único canal e único DR). Os testes são limitados ao campus da Universidade Federal de Santa Maria.

O trabalho está delimitado a implementação e operação do LoRaWAN em classe A, não são suportados dispositivos finais classe B e C. A pilha LoRaWAN não contempla implementação de comandos *MAC*. O Nó Híbrido LoRaWAN terá suporte apenas a um *Data Rate (DR)* no processo de repetição de pacotes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 - Introdução são apresentados introdução sobre o assunto do trabalho e objetivos traçados.

O Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica é apresentado a fundamentação teórica que embasa o trabalho e principais conceitos.

O Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados é apresentado alguns trabalhos que seguem na mesma direção desse trabalho.

O Capítulo 4 - Desenvolvimento é apresentado o desenvolvimento prático do trabalho, a implantação do Nó Híbrido LoRaWAN, tanto de hardware quanto de software embarcado.

O Capítulo 5 - Resultados são apresentados os experimentes realizados, juntamente com os resultados obtidos.

O Capítulo 6 - Conclusão são apresentados as principais conclusões, sugestões e melhorias pra trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências utilizadas na realização do trabalho e anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

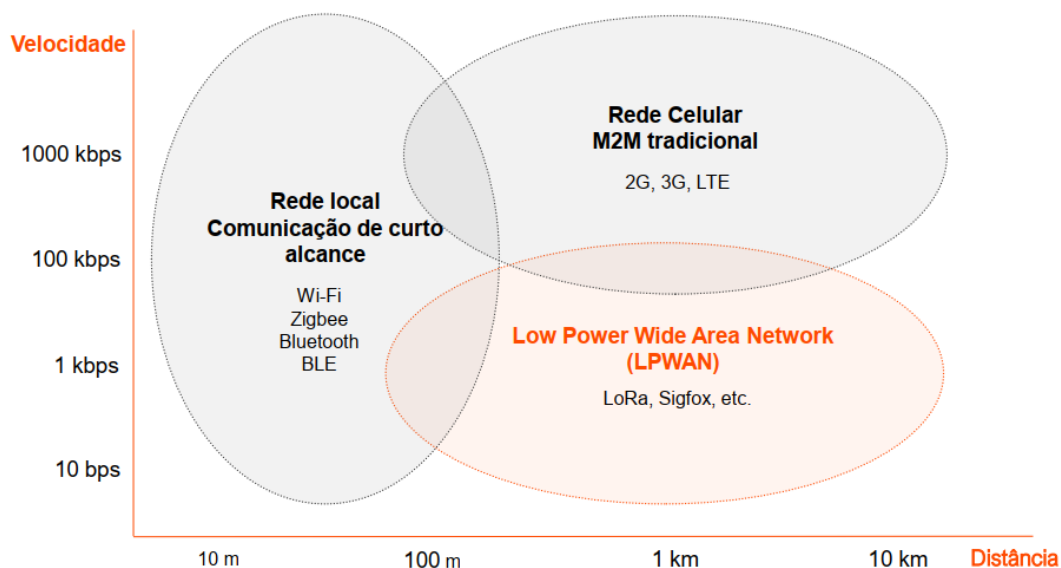
Neste capítulo são apresentados os conceitos relacionados a tecnologia LoRa e LoRaWAN que fundamentam o trabalho.

2.1 LOW POWER WIDE AREA NETWORK

Low Power Wide Area Network (LPWAN) se refere ao conjunto de tecnologias que permitem comunicações entre dispositivos em grandes áreas sendo elas de baixo custo e baixo consumo de energia. A maioria das redes LPWAN operam em bandas de frequência não licenciadas ISM (*Industrial Scientific Medical*) de sub-GHz de longo alcance e topologias em estrela, onde os dispositivos finais são conectados diretamente a um nó único coletor, chamado gateway (SOUZA, 2018).

LPWANs denotam um tipo de rede sem fio com foco em aplicações de baixo consumo de energia e que operem em uma área extensa trazendo alternativas para a comunicação entre usuários e objetos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação, a chamada Internet das Coisas (*IoT - Internet of Things*). Geralmente a conectividade dos dispositivos na IoT são supridas por outras tecnologias, como redes mesh ou GSM, impactando a eficiência no consumo de energia e encarecendo os dispositivos necessários para gerenciamento da rede e dos dados (SOUZA, 2018). Um comparativo entre LPWAN e outras tecnologias pode ser visto na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Comparativo entre LPWAN e outras tecnologias.



Esse tipo de rede é caracterizado por:

- Dispositivos de baixo custo;
- Baixa taxa de dados;
- Pouca quantidade de dados trocados;
- Vida útil longa das baterias dos dispositivos.

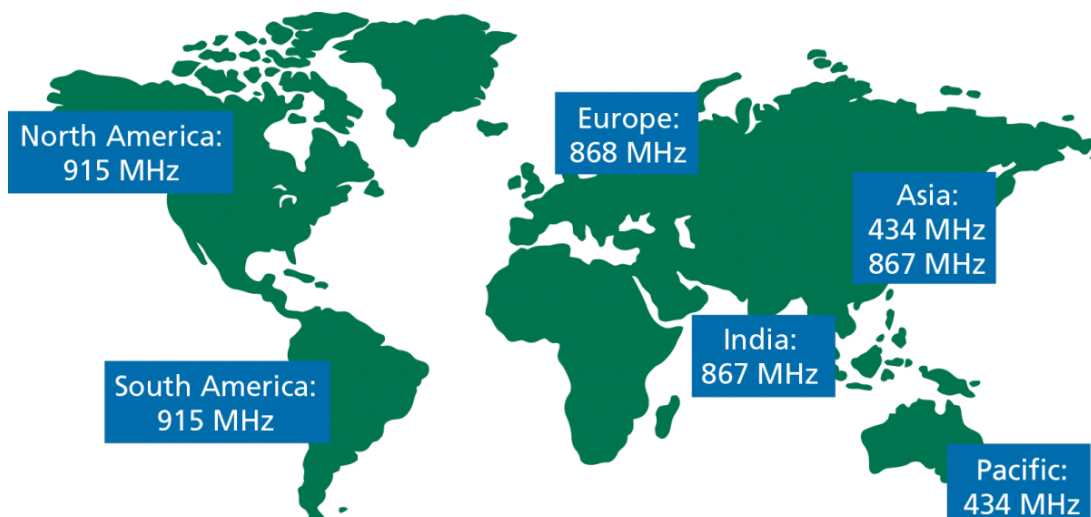
As redes LPWANs representam uma nova tendência na evolução das tecnologias de comunicação sem fio. Ao contrário da banda larga tradicional, essa tecnologia não se concentra em alcançar altas taxas de dados por dispositivo. Em vez disso, as principais métricas de desempenho definidas para esses sistemas são eficiência energética, escalabilidade e cobertura (SOUZA, 2018).

2.2 TECNOLOGIA LORA

LoRa é a camada física da rede de longa distância criada pela Semtech. O nome LoRa significa "Long Range"(Longo Alcance). Essa tecnologia sem fio se classifica na categoria LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) podendo atingir longas distâncias com baixo consumo e baixo custo (Ray, Brian, 2017).

A frequência de operação de LoRa varia para diferentes regiões do planeta e utiliza as frequências ISM (*Industrial Scientific Medical*), como pode ser visto na Figura 2.2. São frequências de uso não restrito. Isso significa que, não é necessário obter uma licença ou pagar uma taxa para utilizá-las (Julio, Branquinho, 2018).

Figura 2.2 – Frequências abertas normalmente utilizadas no LoRa.

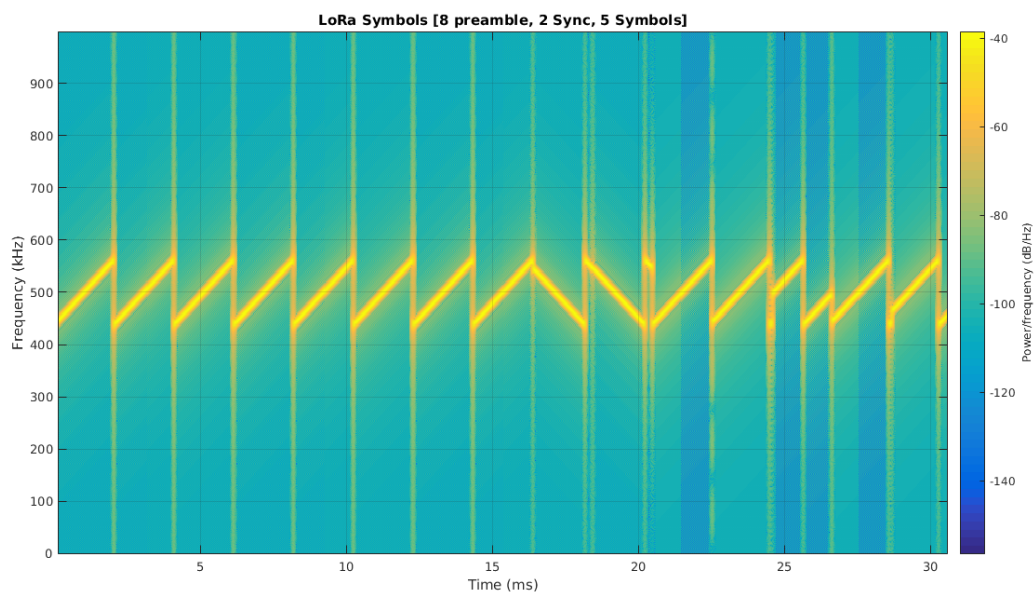


Fonte: Julio, Branquinho (2018).

2.2.1 Modulação LoRa

LoRa usa uma tecnologia de modulação tipo CSS (*Chirp¹ Spread Spectrum*), o que a diferencia de todas outras redes presentes no mercado atualmente (LoRa, Alliance, 2019). A modulação utilizada pela Semtech é especificamente nomeada LoRa Spread Spectrum pois possui características diferenciadas das outras alternativas tradicionais de comunicação por espalhamento espectral (Semtech, 2019a), como pode ser visto na Figura 2.3, utiliza-se *Chirps* inversos para sincronização e defasagem de *Chirps* para codificar os símbolos. Essa modulação tem como característica a alta capacidade de transmissão e recepção do sinal, mesmo com uma baixa potência. Sua capacidade de demodulação do ruído permite que mesmo com uma relação sinal-ruído abaixo de zero, sendo a potência do ruído maior que do sinal recebido, o receptor ainda consegue recuperar (decodificar) a mensagem enviada.

Figura 2.3 – Modulação LoRa CSS (*Chirp Spread Spectrum*).



Fonte: Sakshama, Ghosly (2017)

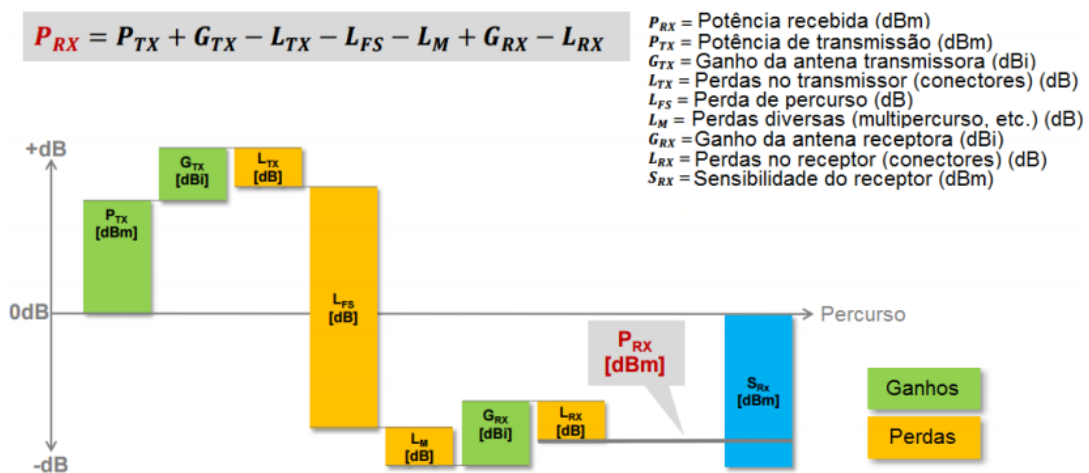
Alguns benefícios da modulação CSS:

- Baixos requisitos de potência de transmissão;
- Robustez inerente a degradações do canal;
- Resistência contra propagação multipercurso;
- Resistência contra efeito Doppler.

¹Compressed High Intensity Radar Pulse

Através do cálculo de enlace para LoRa, ou qualquer outra LPWAN, é possível obter um longo alcance devido às suas características que fornecem maior sensibilidade no receptor. Na Figura 2.4, nota-se que quanto maior for a sensibilidade do receptor S_{RX} , maior pode ser a perda de percurso L_{FS} , diretamente proporcional à distância entre o transmissor e o receptor, de forma que a potência recebida P_{RX} continue dentro da faixa de sensibilidade do receptor (Peter R. Egli, 2015).

Figura 2.4 – Cálculo de enlace para uma LPWAN.



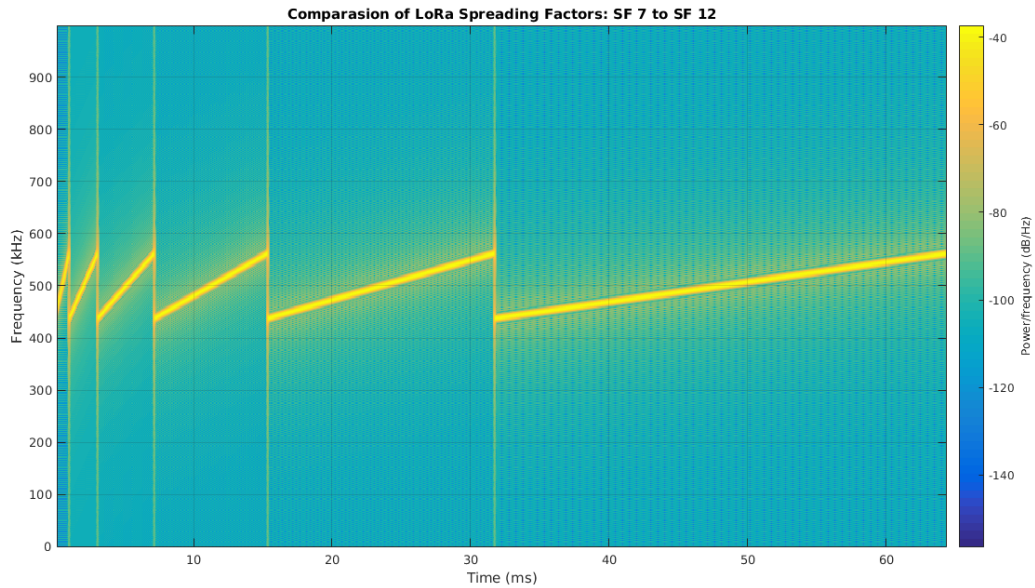
Fonte: Peter R. Egli (2015)

2.2.2 Fator de Espalhamento

O fator de espalhamento SF (*Spreading Factor*) corresponde ao período que a modulação leva entre cada varredura completa do espectro. Quanto maior o fator de espalhamento, mais lenta é a varredura da largura de banda que está sendo usada, consequentemente o pacote fica mais tempo no ar ocupando banda.

Na Figura 2.5 podemos observar os fatores de espalhamento do 7 ao 12 (da esquerda para a direita), também é possível observar que a duração de um *chirp* com determinado fator de espalhamento N será sempre o dobro da duração de um pulso com fator de espalhamento $N-1$ (Sakshama, Ghosly, 2017). O impacto gerado por cada SFs é melhor compreendido no Quadro 2.1.

Figura 2.5 – Comparação dos diferentes fatores de espalhamento: SF 7 ao SF 12.



Fonte: Sakshama, Ghosly (2017)

Relações importantes:

A relação entre a taxa de bits de dados desejada, a taxa de símbolos e a taxa de chip para a modulação LoRa pode ser expressa através da seguinte Equação 2.1.

$$R_b = SF * \frac{4}{4+CR} * \frac{2SF}{BW} * 1000 \quad (2.1)$$

Onde :

SF = Fator de Espalhamento (SF 7 ao SF 12)

BW = Largura de Banda (Hz)

CR = Taxa de codificação (1 a 4)

Período dos símbolos T_s pode ser definido pela Equação 2.2:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} seg \quad (2.2)$$

A partir da Equação 2.2 podemos definir a taxa de símbolos como:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} simbolos/seg \quad (2.3)$$

Com base nas equações anteriores podemos definir a taxa de chips R_c como:

$$R_c = R_s * 2^{SF} \text{ simbolos/seg} \quad (2.4)$$

Ao substituir a Equação 2.3 na Equação 2.4 podemos observar que em LoRa a taxa de *chip* depende apenas da largura de banda: a taxa de *chip* é igual à largura de banda (um *chip* por segundo por Hertz de largura de banda) (Julio, Branquinho, 2018).

O LoRa também inclui um código de correção de erros de tamanho variável, melhorando a robustez do sinal transmitido em detrimento da redundância e fornecendo recursos de recuperação contra a corrupção de bits. Isso é implementado por meio de diferentes taxas de codificação (CR_s) (Julio, Branquinho, 2018).

Quadro 2.1 – Comparação entre diferentes SFs e seus impactos na rede LoRa (Considerando: $BW = 125$, $CR = 1$).

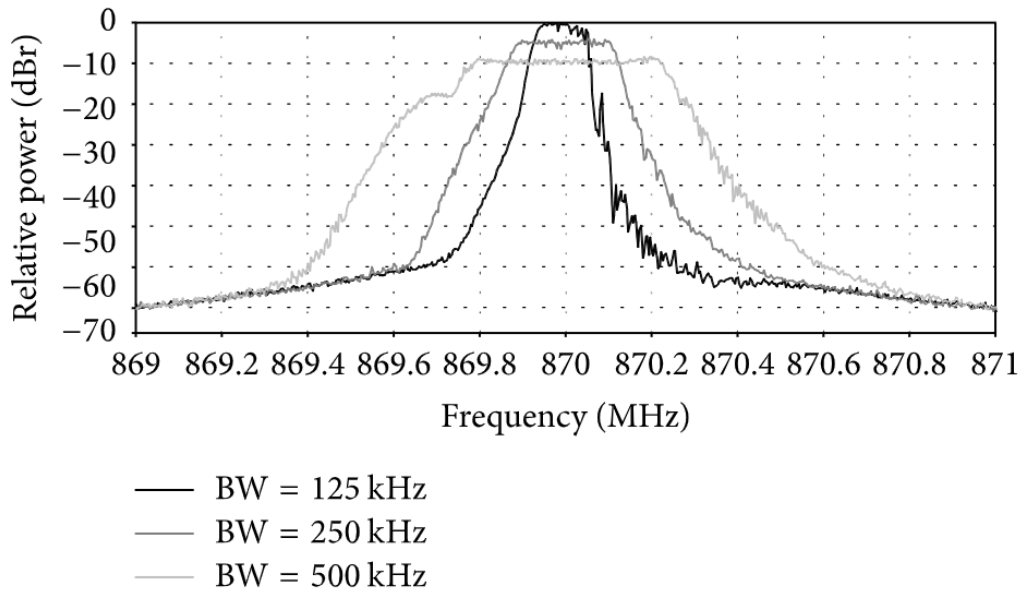
Fator de Espalhamento	Chips/simbolo	SNR limite	Tempo no ar (Pacote de 10 bytes)	Bitrate
7	128	-7,5	56 ms	5469 bps
8	256	-10	103 ms	3125 bps
9	512	-12,5	205 ms	1758 bps
10	1024	-15	317 ms	977 bps
11	2048	-17,5	741 ms	537 bps
12	4096	-20	1430 ms	293 bps

Fonte: Autor.

2.2.3 Largura de Banda

A modulação LoRa não possui largura de banda fixa. Podendo operar com diferentes configurações de largura de banda. A largura de banda do canal geralmente é fixa. Os módulos da Semtech oferecem uma ampla faixa de largura de banda a ser usada. Por exemplo, o rádio SX1276 tem uma faixa de largura de banda de 7,8 kHz a 500 kHz (Semtech, 2019b). Larguras de banda típicas especificadas pelas especificações regionais LoRaWAN são 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz (LoRa, Alliance, 2019). Uma largura de banda maior significa uma taxa de transferência de dados mais alta. A comparação com diferentes larguras de bandas é mostrada na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Comparação das diferentes larguras de bandas.

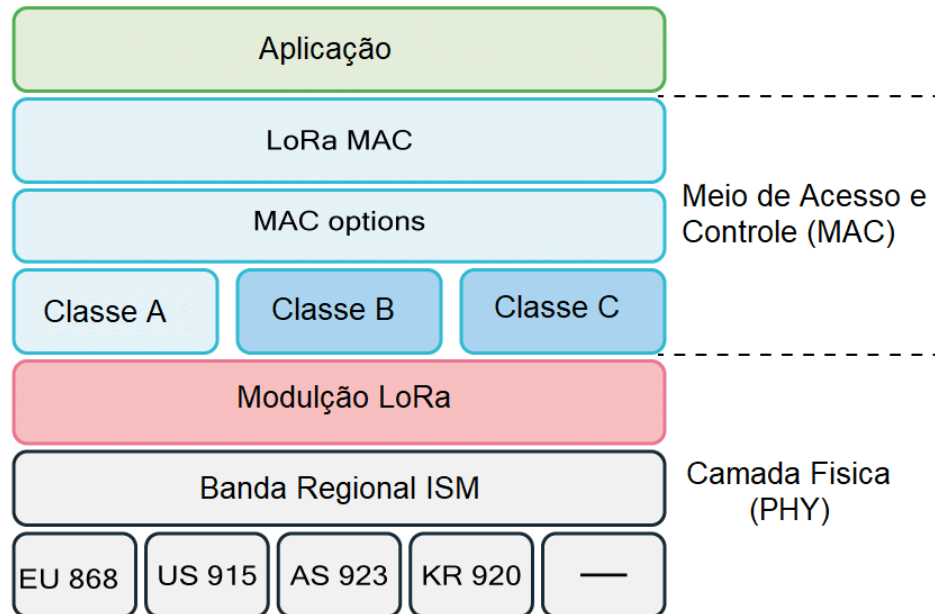


Fonte: Staniec e Kowal (2018)

2.3 LORAWAN

O protocolo LoRaWAN foi projetado para Internet das Coisas (IoT), onde os dispositivos geralmente necessitam de um baixo consumo de energia. O protocolo LoRaWAN utiliza a modulação LoRa, o que proporciona um baixo consumo de potência do dispositivo e longo alcance, chegando na ordem de quilômetros (km). Quando se fala em IoT a segurança é um fator indispensável, sendo que esta já vem embutida no protocolo LoRaWAN, ou seja, todos os dados são criptografados de ponta a ponta, assim assegurando a privacidade da informação que trafega pela rede LoRaWAN. O dispositivo final pode ser um sensor, um medidor de consumo de energia elétrica (*smart meter*), hidrômetros, beacons e muitos outros. A estrutura do protocolo LoRaWAN é mostrada na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Divisão das camadas do protocolo LoRaWAN.

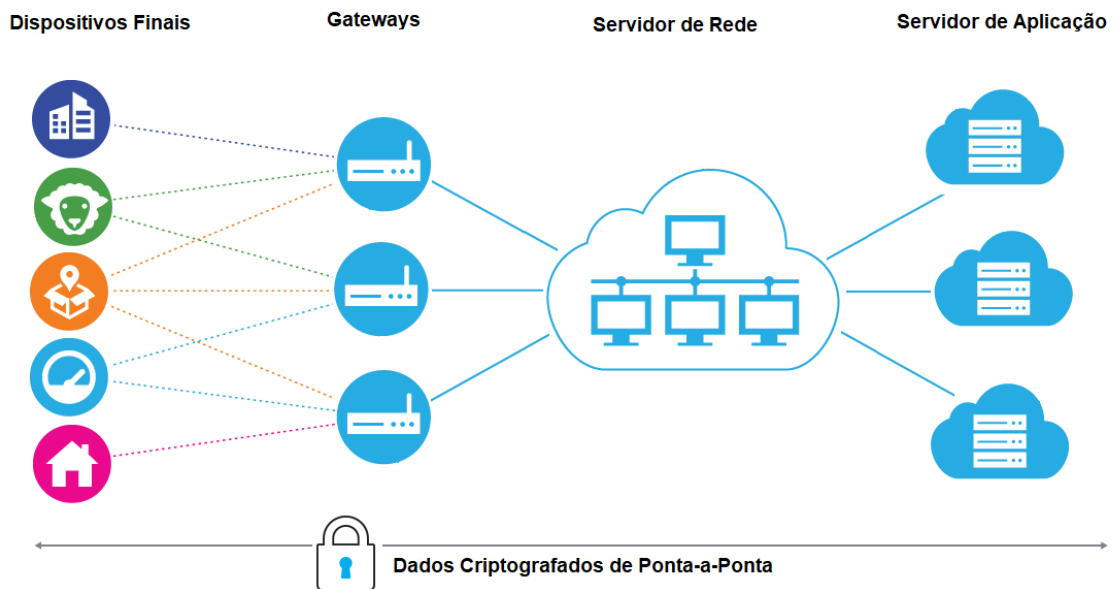


Fonte: Kim, Lee e Kim (2019).

2.3.1 Componentes Básicos da Rede LoRaWAN

Nesta seção serão apresentados cada componente da rede LoRaWAN, assim como a estrutura de funcionamento dos mesmos. A Figura 2.8 mostra de maneira geral, a arquitetura da rede LoRaWAN, representando varios tipos de dispositivos finais, *gateways*, servidor de rede (*Network Server*) e o servidor de aplicação (*Application Server*).

Figura 2.8 – Visão geral dos componentes básicos da LoRaWAN.



Fonte: Autor.

2.3.1.1 Dispositivos Finais

Os Dispositivos finais são dispositivos que realizam algum tipo de tarefa de aquisição e/ou envio de dados, sendo capazes de enviar dados (*uplinks*) e de receber dados (*downlinks*) através da rede LoRaWAN (na maioria das vezes é utilizado o chip SX1276, SX1277, SX1278 ou SX1279 que opera na faixa de frequência de 137MHz a 1050MHz). Esse chip é responsável pela modulação LoRa juntamente com um microcontrolador ou microprocessador que embarca a pilha LoRaWAN, e uma antena para aumentar o ganho de sinal do dispositivo final. A principal característica do dispositivo final é atingir grandes distâncias com baixo consumo de energia.

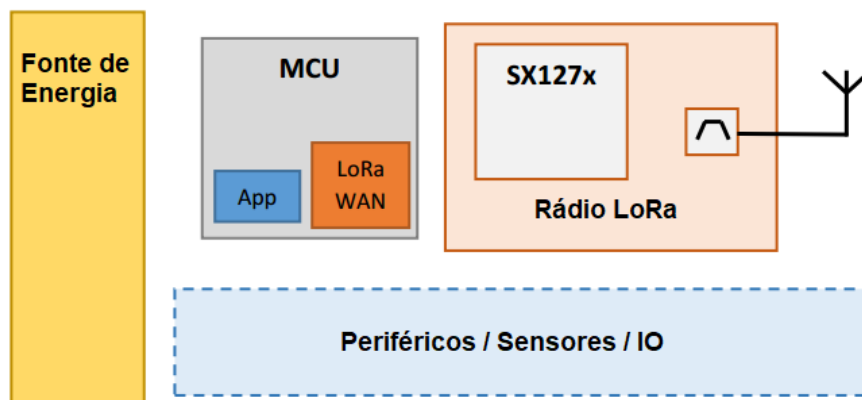
Na Figura 2.9 é mostrado o modem LoRaWAN RHF3M076 e na Figura 2.10 o diagrama modular básico do mesmo, esse opera na banda ISM Sub-GHz, e apresenta interface de comando AT que torna adequado para o usuário acelerar o desenvolvimento.

Figura 2.9 – Modem LoRaWAN RHF3M076 (Dispositivo Final).



Fonte: RisingHF.

Figura 2.10 – Módulos básicos que compõem um dispositivo final LoRaWAN genérico.



Fonte: <https://os.mbed.com/docs/mbed-os/v5.14/porting/lora-port.html> (Mbed).

2.3.1.2 Gateways

Os Gateways são responsáveis por fornecer uma ponte entre os dispositivos finais e a internet, o *gateway* é um dos dispositivos mais importantes em uma rede LoRa. Como exemplo de *gateway* é mostrado na Figura 2.11 um *gateway* da fabricante Kerlink.

Através do protocolo LoRaWAN que os dispositivos finais de uma rede LoRa se comunicam, recebendo e enviando pacotes. Como o objetivo de uma rede de sensores IoT é a captura de dados para a aplicação, fica imprescindível o transporte desses dados pela internet. Desta forma, é necessário que exista uma interface de processamento para identificar um pacote do protocolo LoRaWAN, capturar seu payload e informações importantes, reencapsular em um pacote do protocolo IP e enviá-lo para um servidor de internet, que o encaminha para a camada de aplicação normalmente um servidor de rede. De forma básica um *gateway* é composto de um o módulo LoRa normalmente multicanal (na maioria das vezes o chip SX1301 de 8 canais) que recebe e envia os pacotes através do protocolo LoRaWAN e uma interface ethernet ou Wi-Fi (IEEE 802.11) para a comunicação com um servidor de rede via internet.

Figura 2.11 – Gateway LoRaWAN.



Fonte: Kerlink.

2.3.1.3 Servidor de Rede

O Servidor de rede (*Network Server*) de forma geral é responsável por receber, armazenar e gerenciar os dados recebidos através dos *gateways*, sendo ele o responsável por varias tarefas de gerenciamento da rede, tais como:

- Gerenciamento de *uplinks* para aplicações certas, e *downlinks* para os dispositivos finais corretos, também selecionando o melhor *gateway* em relação ao dispositivo

final para envio do *downlink* no caso de múltiplos *gateways*;

- Gerenciamento das potências de transmissão e largura de banda dos dispositivos finais que possuem *ADR* ativo;
- Descriptografia dos *uplinks* e checagem de validade dos mesmos, desprezando-os em caso de *uplinks* com incoerência ou pacotes duplicados;

2.3.1.4 Servidor de Aplicação

O Servidor de Aplicação (*Application Server*) é responsável pela gestão da camada de aplicação, assim como as chaves de criptografia, endereço dos dispositivos finais e outras tarefas tais como:

- Descriptografar os *payloads*;
- Disponibilizar os *uplinks* recebidos pelos dispositivos finais;
- Preparar e gerir os *downlinks* a serem enviados para os dispositivos finais;

O Servidor de Aplicação mantém os *payloads* dos *uplinks* e *downlinks*, e deve proporcionar alguma forma de acesso a esses dados a partir dos dispositivos clientes, através de chamadas de API, bibliotecas, acesso ao banco de dados, etc. Também deve gerar os ACKs necessários em caso de recepção de *uplinks* com requisição de confirmação de entrega, e chaves de criptografia para os dados no momento do registro dos dispositivos finais (RABUSKE, 2017).

2.3.2 Arquitetura da Rede LoRaWAN

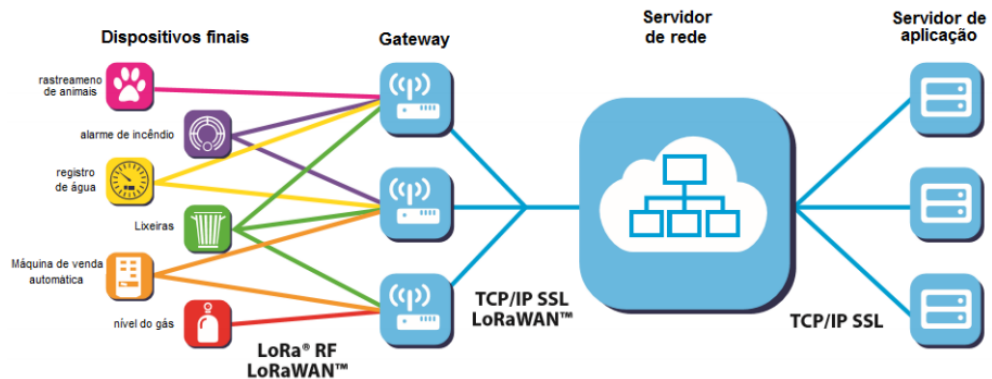
Na rede LoRaWAN os dispositivos finais enviam os dados de forma assíncrona para qualquer *gateway*² que esteja na sua área de cobertura. A topologia da rede se baseia num arranjo do tipo estrela, similar a uma rede Wi-Fi ou de telefonia celular. A arquitetura da rede LoRaWAN é mostrada na Figura 2.12.

A rede LoRaWAN é concebida na topologia em estrela tendo com dispositivos receptores de dados os *gateways* que são capazes de suportar grandes números de dispositivos finais (*Nodes*).

²Dispositivo central da rede LoRaWAN que funciona como ponte entre os dispositivos finais e o servidor de rede descrito na seção 2.3.1.2.

Uma rede LoRaWAN tem seu desempenho melhorado através de estratégias de controle aplicadas da rede, assim como, a utilização de Adaptive Data Rate (ADR) e comunicação multicanal. Os fatores críticos para determinar a capacidade do *gateway* são: número de canais, taxa de transmissão (tempo no ar), comprimento das mensagens e periodicidade de transmissão dos dispositivos finais (OLIVEIRA, 2017).

Figura 2.12 – Arquitetura da rede LoRaWAN.

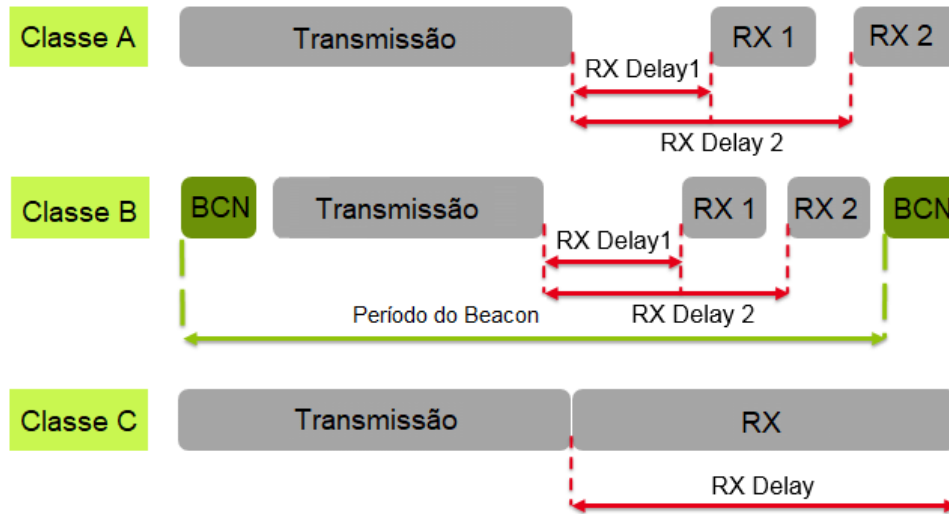


Fonte: Oliveira (2017).

2.3.3 Classes de Dispositivos LoRaWAN

O LoRaWAN dispõe de três classes de dispositivos para diferentes tipos de aplicação, com isso oferece alternativas que devem ser levadas em conta, duração da bateria e latência no *downlink*. O funcionamento das classes A, B e C é mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Funcionamento das Classes A, B e C LoRaWAN.



Fonte: Oliveira (2017).

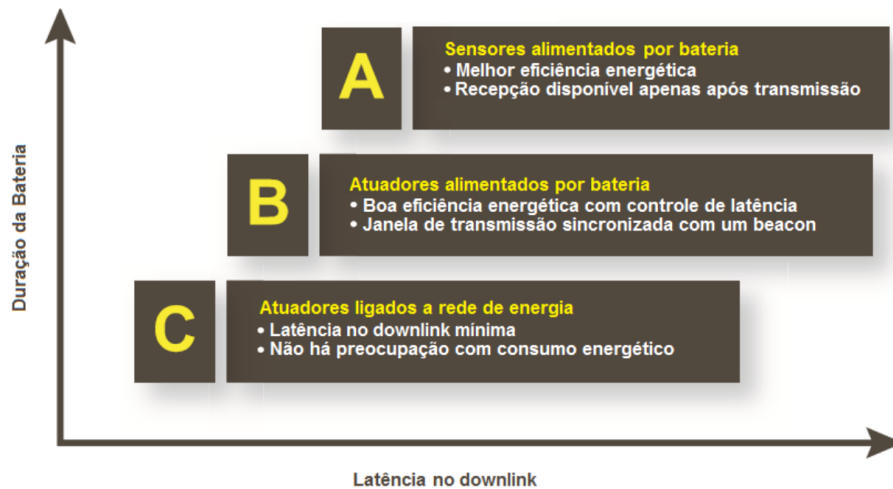
Classe A : Dispositivos que operam em classe A permitem comunicação bidirecional, sendo que após a transmissão feita pelo dispositivo final são abertas duas janelas de recepção. A transmissão dos dispositivos finais é agendada dependendo das necessidades de cada aplicação. A classe A apresenta a melhor eficiência energética pois permite longos períodos de inatividade do dispositivo final. Caso seja necessário o recebimento de dados do servidor de rede, é preciso aguardar a próxima transmissão agendada pelo dispositivo final, gerando latência no *downlink* proporcional ao período de transmissão da aplicação (OLIVEIRA, 2017).

Classe B : Nos dispositivos que operam em classe B além das janelas de recepção já presentes nos dispositivos finais Classe A, são agendadas outras janelas de recepção sincronizadas por um sinal emitido pelo *gateway* (beacon). Desta forma a latência no *downlink* pode ser reduzida ao custo de uma menor eficiência energética por aumentar o nível de atividade do dispositivo final (OLIVEIRA, 2017).

Classe C : Nos dispositivos que operam em classe C a janela de recepção é praticamente contínua, exceto quando o dispositivo final está transmitindo. A latência no *downlink* se torna mínima, porém a eficiência energética é bastante afetada já que o dispositivo está constantemente ativo, apresenta a menor eficiência energética (OLIVEIRA, 2017).

A Figura 2.14 faz um comparativo quando o quesito é duração da bateria x latência.

Figura 2.14 – Comparativo das classes LoRaWAN.



Fonte: Oliveira (2017).

2.3.4 Segurança da Rede LoRaWAN

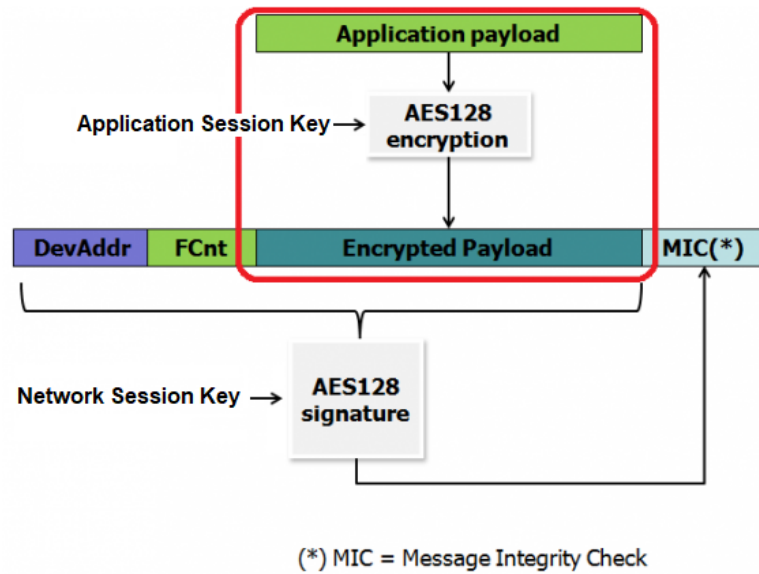
A comunicação na rede LoRaWAN é criptografada, ou seja, após o dado ser enviado pelo dispositivo final, que somente será descryptografado pelo *application server*. As duas chaves são (*NwkSKey* e *AppSKey*):

- **AppSKey**, conhecida pelo dispositivo final e pelo *application server*, que é utilizada para criptografar e descryptografar o *payload* do pacote. A criptografia realizada com essa chave utiliza o algoritmo AES-CMAC (RABUSKE, 2017);
- **NwkSKey**, conhecida pelo dispositivo final e pelo *network server*, que serve para criptografar e descryptografar os dados do pacote relacionados ao MIC (*Message Integrity Checksum*), que validam a integridade do pacote. A criptografia realizada com essa chave utiliza o algoritmo AES-128 (RABUSKE, 2017).

Na LoRaWAN para garantir a privacidade dos dados são implementados dois níveis de segurança.

- **Criptografia no *payload***, neste caso os dados a serem transmitidos são criptografados usando o algoritmo AES de 128 bits, com uma chave conhecida como "*Application Session Key*" (*AppSKey*). O processo de criptografia do *payload* é mostrado na Figura 2.15.

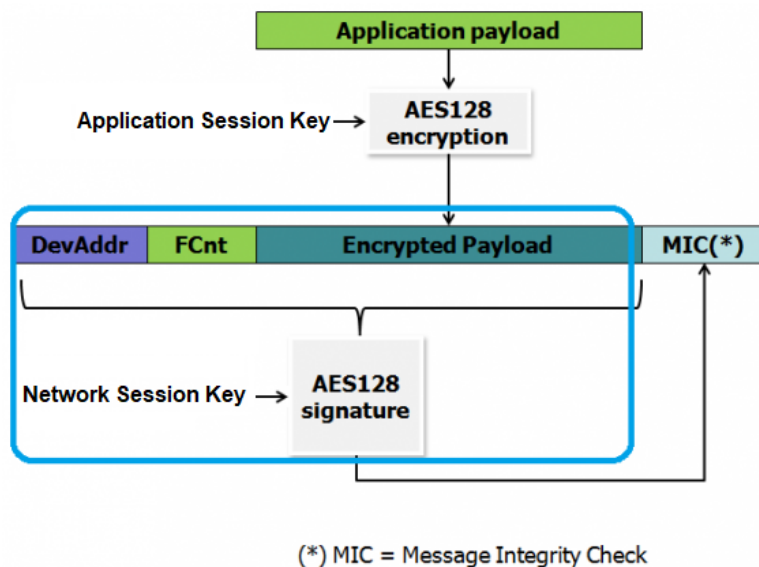
Figura 2.15 – Processo de criptografia do *payload*.



Fonte: Junior (2019).

- **Verificação de integridade do pacote**, o número "MIC" (2 bytes) é gerado usando a mesma técnica de criptografia (AES de 128 bits), mas com uma outra chave, conhecida como "*Network Session Key*" (*NwkSKey*). Esta chave serve para que o servidor de rede possa garantir que o pacote recebido não foi alterado por erros ou propositalmente. Observe que o servidor de rede pode apenas checar a integridade do pacote e nunca "abrir" os dados, pois não tem a "*Application session key*". O processo de criação do MIC é mostrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Processo de criação do MIC.



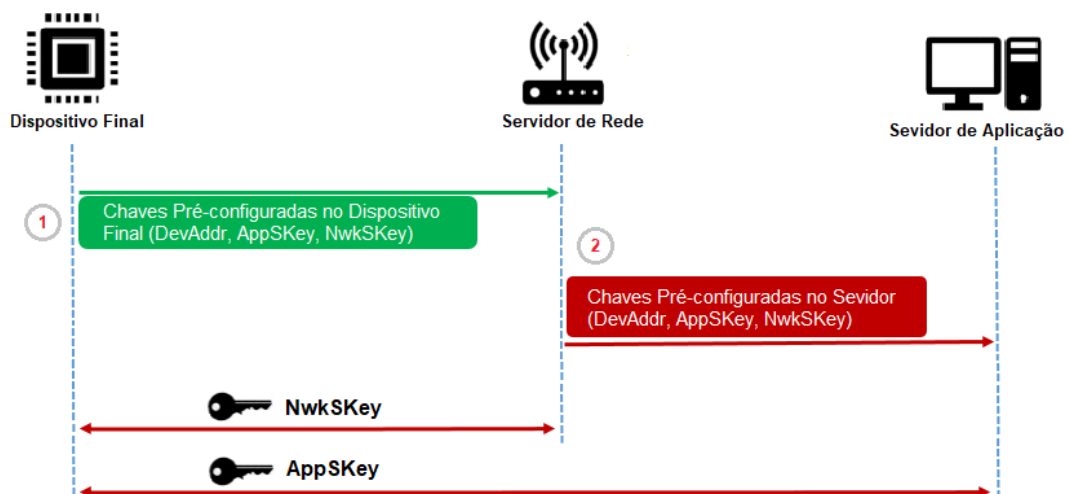
Fonte: Junior (2019).

2.3.5 Ativação de Dispositivos na Rede LoRaWAN

Na rede LoRaWAN, os dispositivos finais são registrados em aplicações no *network server* para, então, serem ativados. Cada *application* possui um identificador único de 64 bits chamado de *AppEUI*, ao qual o dispositivo final é vinculado durante seu registro. Após o registro, é gerado um identificador único para o dispositivo final, também de 64 bits, chamado de *DevEUI*. O *AppEUI* e o *DevEUI* serão utilizados pelo *network server*, para que o dispositivo final seja identificado durante a ativação e seja gerado para o mesmo um endereço de 32 bits chamado de *DevAddr*, usado na identificação e roteamento dos *uplinks* e *downlinks* (RABUSKE, 2017).

ABP : ABP (*Activation By Personalization*) é a forma mais simples de ativação dos dispositivos finais. Ela consiste em realizar a ativação manualmente no *application server*, gerando as chaves de criptografia (*NwkSKey* e *AppSKey*) e inserindo-as manualmente nos dispositivos finais, juntamente com seus *DevAddr* e *DevEUI* gerados e *AppEUI* ao qual estão vinculados, o processo de autenticação ABP é mostrado na Figura 2.17. Por outro lado, esse tipo de ativação torna o *setup* inicial da rede mais trabalhoso em caso de redes maiores, uma vez que cada dispositivo final precisa ser configurado manualmente. Além disso, esse método não é tão seguro, pois as chaves de criptografia permanecem inalteradas (RABUSKE, 2017).

Figura 2.17 – Processo de autenticação por ABP.

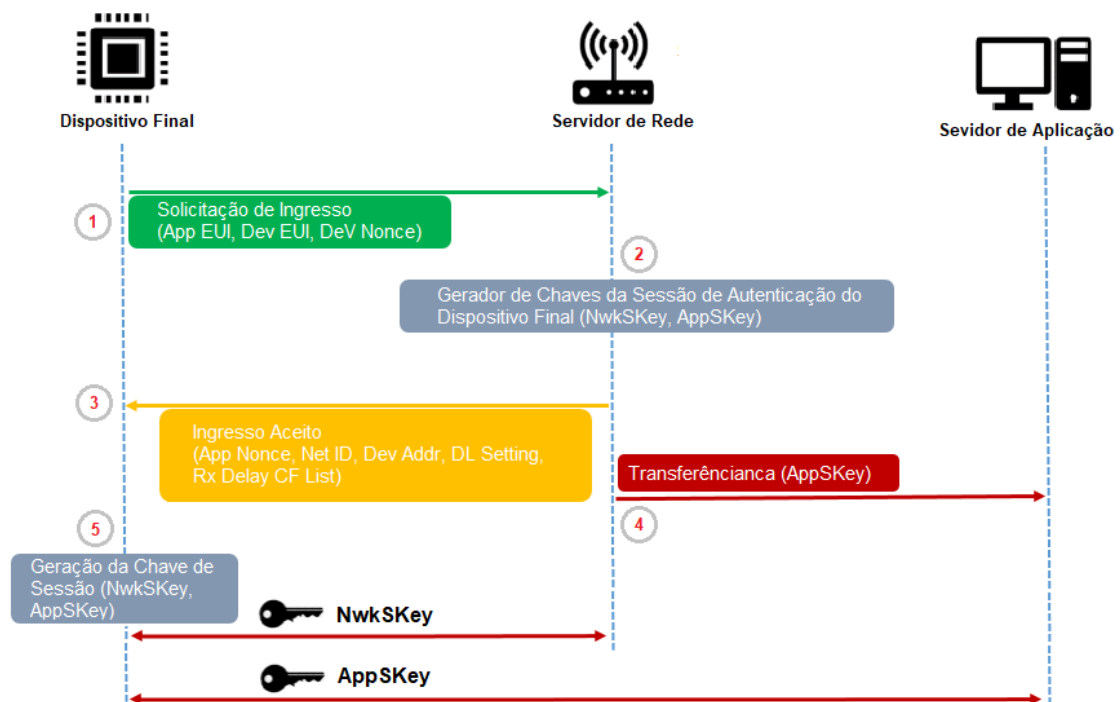


Fonte: Autor.

OTAA : A OTAA (*Over The Air Activation*) é uma forma de ativação mais complexa do que a ABP, porém, também é mais segura e prática, pois, ao utilizá-la, os motes são capazes de realizar suas próprias ativações, o processo de autenticação OTTA é mostrado na Figura 2.18. Antes do processo de ativação, deve ser gerado um *DevEUI*, assim

como na ABP, e inseri-lo no dispositivo final, juntamente com o JoinEUI, que é o identificador único do Join Server e, em alguns casos, como na plataforma aberta da The Things Network, é igual ao AppEUI. Também se faz necessária a inserção da AppKey no dispositivo final, utilizando-se para isso alguma conexão criptografada com outro protocolo (por exemplo, Bluetooth), para que não ocorra o risco da mesma ser interceptada e a AppKey descoberta por terceiros, ou inserindo-a manualmente no dispositivo final, sendo essa a opção mais segura, ainda que seja menos prática em casos com uma grande quantidade de dispositivos finais (RABUSKE, 2017).

Figura 2.18 – Processo de autenticação por OTAA.



Fonte: Autor.

2.3.6 Faixa de Frequência Utilizada no Brasil e Normativa

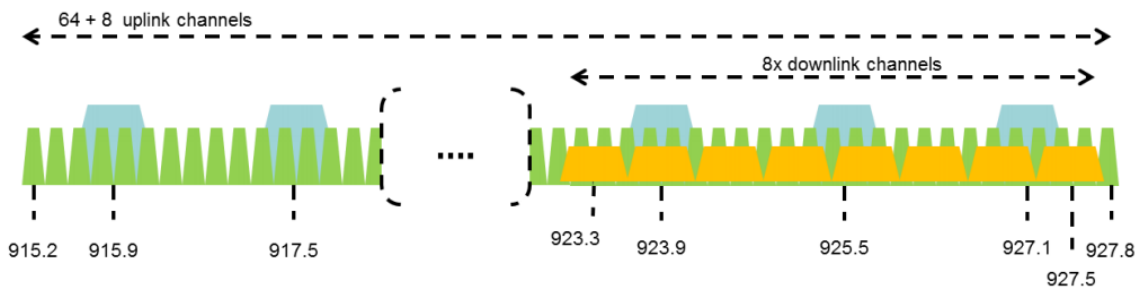
A faixa de frequência utilizada no Brasil é a mesma que é utilizada na Austrália. A ANATEL publicou o **ATO N° 14448** (ANATEL, 2017) que regulamenta a tecnologia LoRa no Brasil, definindo o plano de frequência para América Latina como sendo o padrão Australiano, operando na faixa de 915-928 MHz na banda ISM, com *Air Time* (**Tempo de ar**)³ inferior a **400ms**. A disposição de canais Australianos (**AU915-928**) que é a mesma faixa utilizada no Brasil é mostrada na Figura 2.19.

³Tempo em que o pacote permanece no ar até chegar ao *gateway*.

As frequências da banda Australiana (**AU915-928**) são divididas em canais de *upstream* e *downstream* da seguinte forma:

- **Upstream:** São divididos em 64 canais numerados de 0 a 63 utilizando LoRa 125 kHz BW variando de DR0 até DR5, usando taxa de codificação 4/5, começando em 915.2MHz e aumentando linearmente com um passo de 200 kHz até 927.8MHz;
- **Upstream:** São divididos em 8 canais numerados de 64 a 71 usando o LoRa 500 kHz BW com DR6, começando em 915.9MHz e aumentando linearmente com um passo de 1.6 MHz até 927.1MHz;
- **Downstream:** São divididos em 8 canais numerados de 0 a 7 utilizando o LoRa 500 kHz BW com DR8 até DR13, iniciando em 923,3 MHz e aumentando linearmente com um passo de 600 kHz até 927,5 MHz

Figura 2.19 – Diagrama de canais *uplink* e *downlink* no padrão da Austrália.



Fonte: LoRa Alliance (2019)

A Tabela 2.1 mostra como foram concebidos os padrões de *Data Rate* (DR), relacionando-os com fator de espalhamento, largura de banda, taxa máxima de transmissão e tamanho máximo de *payload* a fim que não ultrapasse os 400ms de tempo de ar.

Tabela 2.1 – Relação entre fator de espalhamento e largura de banda de cada e *payload* máximo *data rate*.

<i>Data Rate</i>	Fator de Espalhamento / Largura de Banda	Taxa de Transmissão (bit/s)	<i>Payload</i> Máx (bytes)
0	SF12 / 125 kHz	250	–
1	SF11 / 125 kHz	440	–
2	SF10 / 125 kHz	980	19
3	SF9 / 125 kHz	1760	61
4	SF8 / 125 kHz	3125	133
5	SF7 / 125 kHz	5470	250
6	SF8 / 500 kHz	12500	250
7	Reservado	–	–
8	SF12 / 500 kHz	980	41
9	SF11 / 500 kHz	1760	117
10	SF10 / 500 kHz	3900	230
11	SF9 / 500 kHz	7000	230
12	SF8 / 500 kHz	12500	230
13	SF7 / 500 kHz	21900	–
14	Reservado	–	–
15	Definido no LoRaWAN	–	–

Fonte: LoRa Alliance (2019), Adaptado pelo Autor.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nessa seção serão apresentados trabalhos com propostas semelhantes ao Nó Híbrido LoRaWAN, que seguem na linha de capturar pacotes e reenvia-los de alguma forma, com um salto ou múltiplos saltos. A grande maioria destes trabalhos são projetos acadêmicos ou produtos disponíveis no mercado que tem como base de estudos ou aplicação as redes LoRa.

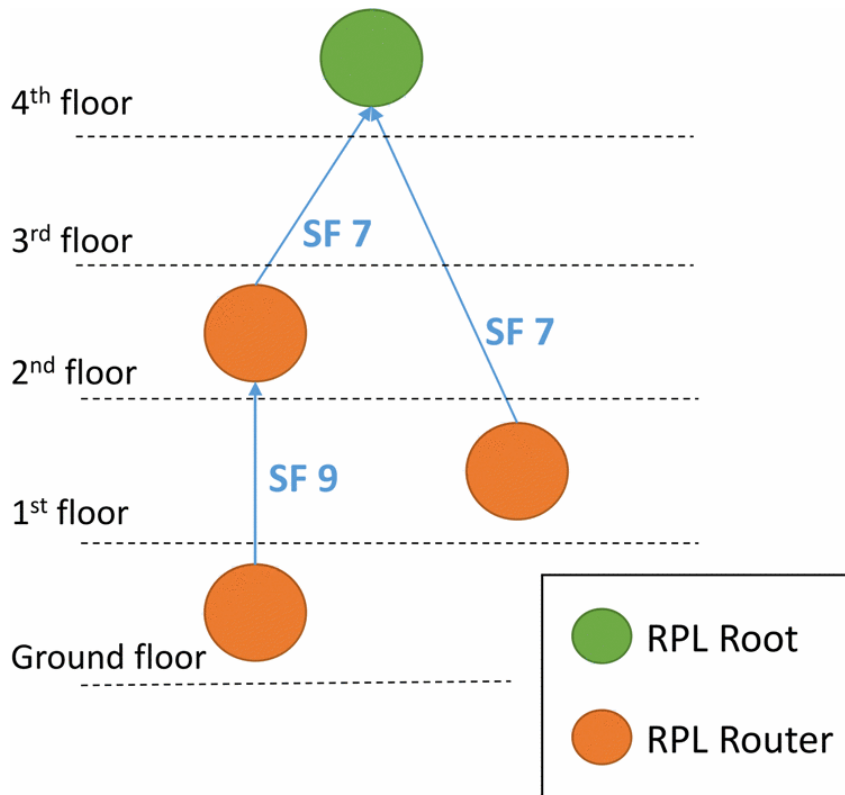
3.1 PROPOSTAS PARA MELHORIA DA TAXA DE ENTREGA/CONFIABILIDADE DA REDE LORA

Nessa seção são apresentados trabalhos que abordam a otimização dos parâmetros da rede, como alocação de SF e canais e técnicas de controle de acesso ao meio.

3.1.1 Proposta de Comunicações multihop RPL baseadas em LoRa

Comunicações multihop RPL baseadas em LoRa é uma solução que permite comunicações LoRa multi-salto. Isso é feito por um protocolo MAC recém-projetado (RLMAC), usado para selecionar o fator de espalhamento para cada vizinho disponível. A Função Objetiva proposta usada pelo RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) tem capacidade de selecionar o caminho de roteamento que minimiza o tempo no ar. Ao selecionar o caminho com o menor tempo no ar, com isso o consumo de energia pode ser diminuído, aumentando a vida útil da bateria (Sartori et al., 2017). A topologia de rede RPL é mostrada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Topologia de rede RPL.



Fonte: Sartori et al. (2017)

O RLMAC trabalha basicamente com dois modos o loop lento e loop rápido, o primeiro é utilizado para descobrir os nós que estão na sua vizinhança, após essa descoberta o nó muda para o loop rápido. Fazendo isso, o nó descobrirá o maior número possível de nós ouvindo todos os SFs disponíveis. O RLMAC não agenda mensagens em um momento preciso, mas dentro do intervalo de tempo certo (ordem de magnitude de dezenas de segundos), o que por sua vez gera uma latência muito grande em toda rede e problemas relacionados com a sincronia de rede.

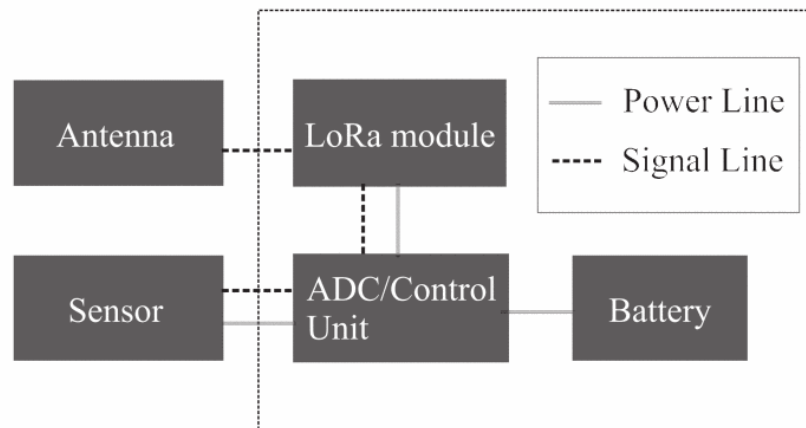
Dessa forma (Sartori et al., 2017) conclui que habilitar o multi-hop com RPL em dispositivos LoRa é uma questão desafiadora. Para lidar com isso, um novo protocolo MAC chamado RLMAC foi proposto. Possui um mecanismo de descoberta assíncrona de nós vizinhos e oferece a possibilidade de um nó atuar como roteador, graças aos intervalos de tempo dedicados a diferentes SFs. Isso permite selecionar o SF ideal por link, otimizando o tempo no ar e o consumo de energia.

O principal problema dessa proposta é a grande latência e a sincronia da base de tempo da rede, principalmente em redes com mais nós. Uma vantagem dessa proposta é a melhoria na vida útil da bateria, mas isso não fica evidente, pois não são mostrados dados sobre o consumo dos nós.

de transmissão devido a um erro de relógio interno do nó final (Terada; Mukai; Yokotani, 2019).

Já configuração do nó final composta por uma unidade de ADC/Controle pode ser implementada com um PIC (Peripheral Interface Controller). O ADC converte o sinal analógico detectado em informação digital, assim, controlando o nó final. Quando o módulo LoRa é ativado, ele fica na espera dos dados do downlink (estado de espera) (Terada; Mukai; Yokotani, 2019). O módulo ADC/Controle é apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagrama de blocos do nó final.



Fonte: Terada, Mukai e Yokotani (2019)

O módulo ADC está sempre ativo e interrompe a fonte de alimentação do módulo LoRa para reduzir o consumo de energia durante o período de estado de repouso, este método proporciona uma redução de 17%, se comparado ao método ALOHA convencional.

Neste artigo, foi proposto um método de alocação de largura de banda que evita a colisão de pacotes LoRaWAN baseado no controle de sono dos dispositivos finais. O método de alocação de largura de banda que foi proposto permite que cada nó opere cooperativamente, assim, prevenindo a colisão de pacotes entre nós. Também o controle de sono foi incorporado a esse método o que proporciona uma maior economia de bateria. Vale a pena ressaltar que esse método é teórico e não foi testado em ambiente real, esses testes serão realizados futuramente segundo os autores.

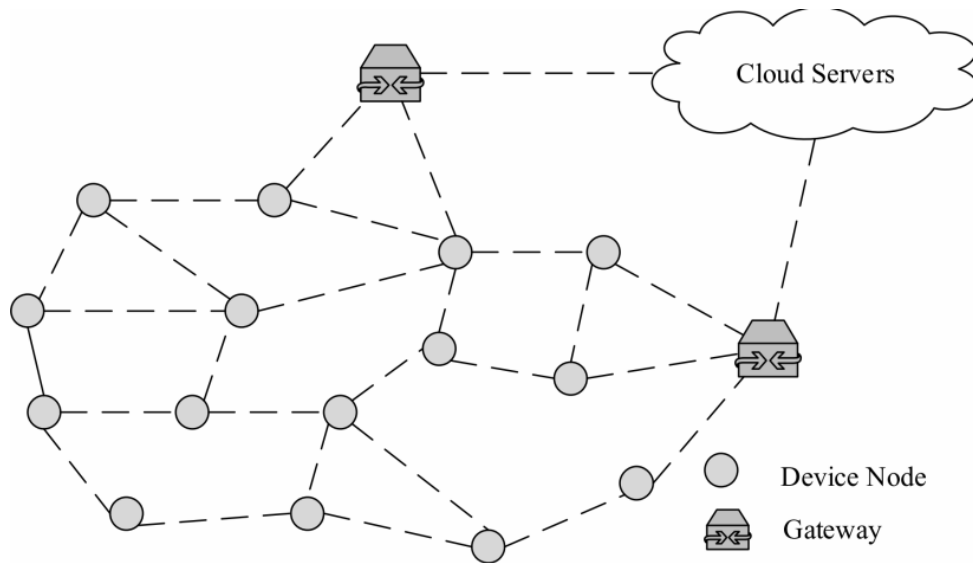
3.2 PROPOSTAS PARA AUMENTO DA COBERTURA/ALCANCE DA REDE

Nessa seção são apresentados trabalhos com proposta de uso de repetidores e propostas de rede mesh.

3.2.1 Modelo analítico de uma topologia Mesh baseada na tecnologia LoRa

No trabalho (Kirichek et al., 2020) os autores propõem um modelo de topologia de malha para a rede LoRa, nesse método consiste em encontrar uma rota baseada na intensidade de sinal recebido (RSSI) para encontrar o caminho ideal até o concentrador. Em um modelo gráfico de topologia de malha, a rede inclui nós e gateways conectados entre si. Um exemplo de modelo gráfico de topologia de malha é mostrado na 3.4

Figura 3.4 – Gráfico de uma rede (nós e gateways).



Fonte: Kirichek et al. (2020)

O nó pode ser um dispositivo final ou um nó de retransmissão, através do qual os dados são retransmitidos. Os dados recebidos pelo nó serão encaminhados para o próximo nó, de acordo com a rota ideal para o destino. O caminho de roteamento é calculado para encontrar a rota ideal para o destino. O parâmetro RSSI (Indicação da força do sinal recebido), que pode ser considerado como a potência do sinal entre o transmissor e o receptor. Uma matriz $C = c_{i,j}$ onde $i, j = 1 \dots n, s$ contém as características dos nós de comunicação da rede (pesos das arestas do gráfico). Aprestado na equação 3.1.

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & c_{1,n} & c_{1,s} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & c_{2,n} & c_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{n,1} & c_{n,2} & \cdots & c_{n,n} & c_{n,s} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Na Figura 3.4 há um conjunto de caminhos possíveis $\Omega = P_{i,s} = P_1, P_2, \dots, P_k$ entre nós, assim, o percurso nó e coletor (gateway) é definido pela equação 3.2.

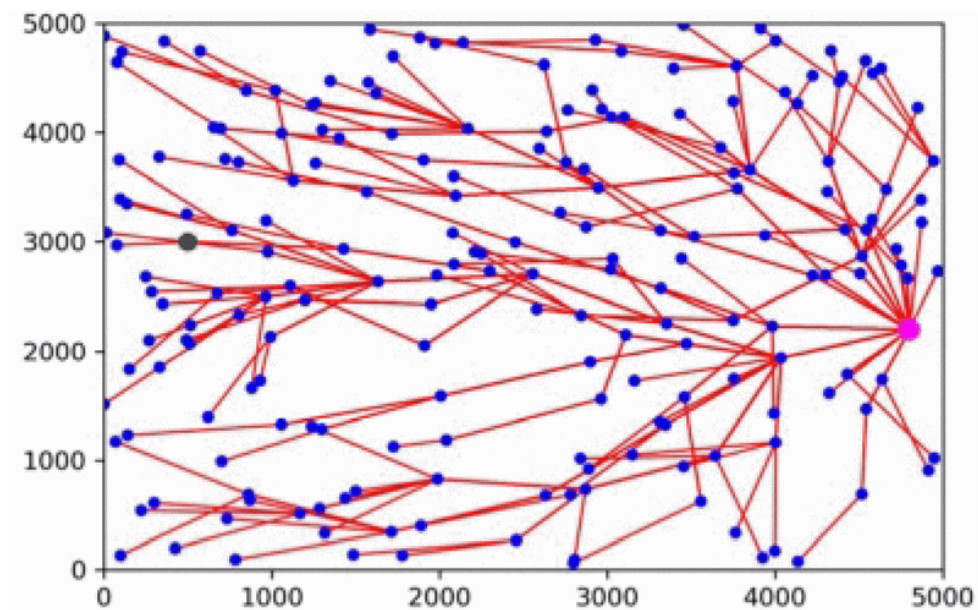
$$w_{i,s} = \sum_{j=1}^{j=|P_{i,s}|-1} c_{i,j+1} \quad (3.2)$$

A rota ideal do nó i para o nó coletor é calculada pela Equação 3.3, com isso cada nó pode encontrar a melhor rota.

$$Route_{i,s} = \arg \min_{P_{i,s} \in \Omega} (w_{i,s}) \quad (3.3)$$

Para fins de análise foi considerado 200 nós de dispositivo distribuídos aleatoriamente em um campo com um tamanho de 5000x5000 metros. O resultado é mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Caminho mais curto de todos os nós para o gateway



Fonte: Kirichek et al. (2020)

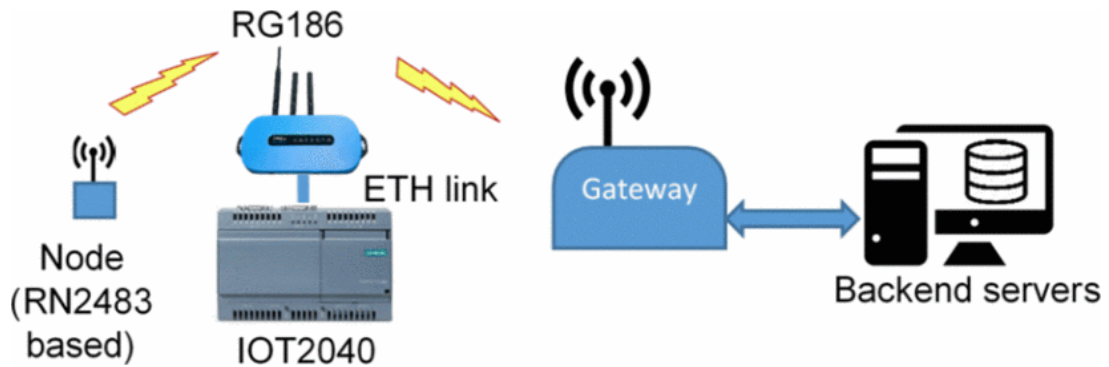
Assim (Kirichek et al., 2020) conclui, que o modelo de topologia em malha combinado com a tecnologia LoRa pode trazer mais vantagens na rede de sensores sem fio como aumento da área de cobertura, mas temos que ter muito cuidado quando o sistema deve ter baixa latência e baixo consumo de energia. Deve se considerar que a proposta de (Kirichek et al., 2020) acrescenta maior latência ao sistema e aumento no consumo de energia já que o nó deve acordar quando um pacote tem que ser retransmitido.

3.2.2 Nó LoRaWAN Para IoT industrial Aprimorado

Neste trabalho (Sisinni et al., 2018) a tecnologia LoRaWAN é abordada, graças à ampla aceitação que recebeu no meio industrial e acadêmico. Em particular, um nó aprimorado é proposto como um componente básico das redes sem fio industriais IoT-Embarcado. Oferece novos recursos: se comporta como um nó clássico; podendo atuar

como uma porta de entrada para redes legadas / diferentes (com fio); e pode estender a cobertura LoRaWAN atuando como um extensor de alcance (ou seja, um encaminhador de salto único) esse dispositivo proposto é denominado de **e-node** (Sisinni et al., 2018). O diagrama do **e-node** proposto é mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Diagrama proposto pelos desenvolvedores do e-node.



Fonte: Sisinni et al. (2018)

O **e-node** deve se comportar como um nó LoRaWAN regular (por exemplo, ao atuar como um gateway para redes herdadas) e como um repetidor (Nota: o roteamento seria possível apenas modificando o protocolo, perdendo a compatibilidade com versões anteriores, pois o endereço é usado para codificação da carga útil). No último caso, as mensagens de uplink e downlink devem ser propagadas se não existirem links diretos. Nesta implementação preliminar, é obtido um comportamento transparente do **e-node**, explorando às duas janelas de recebimento permitidas pelo LoRaWAN. É preciso destacar que, se um quadro for recebido na primeira janela (e se destina ao dispositivo final de escuta), a segunda janela não é aberta (Sisinni et al., 2018).

Esse artigo é o que mais se assemelha ao trabalho proposto, mas com objetivo principal de conexão direta com o servidor de rede, sendo possível seu funcionamento como repetidor com algumas modificações que não são apresentadas no mesmo.

3.3 PROPOSTAS HÍBRIDAS PARA AUMENTO DE COBERTURA E DA TAXA DE ENTREGA

Nessa seção são apresentados trabalhos com proposta de uso de solicitação de repetição automática (ARQ) e baseados em técnicas de ajuste de SF automático.

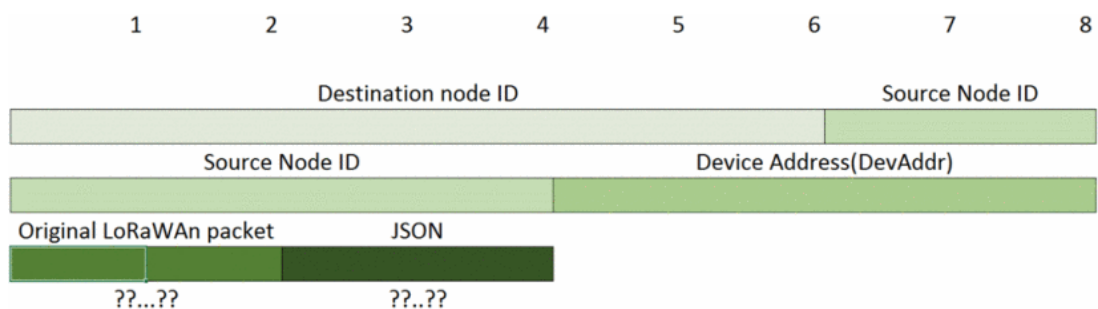
3.3.1 Um protocolo de roteamento para redes LoRA Mesh

O protocolo de roteamento para redes LoRA Mesh fornece uma comunicação e roteamento entre gateways LoRa, a fim de fornecer cobertura em áreas remotas. Esse protocolo é baseado no protocolo HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) e no roteamento AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector), adaptado às demandas de redes e dispositivos LoRa. Uma implementação de prova de conceito desse protocolo e sua eficácia em testes de laboratório e testes em campo (Lundell et al., 2018).

Cada gateway mantém uma tabela de roteamento contendo cinco campos: destino, próximo salto, número de sequência de destino e contagem de saltos, que é usado como métrica de roteamento. A tabela de roteamento é atualizada quando são recebidas informações sobre uma rota com um número de sequência de destino mais alto ou uma contagem de saltos mais baixa (Lundell et al., 2018).

Sempre que um gateway recebe uma mensagem de uplink de um dispositivo, ele armazena o endereço do dispositivo e o número de identificação do nó (ID) do nó de destino em uma tabela de dispositivos. Mais tarde, quando o gateway recebe uma mensagem de downlink, ele verifica na tabela de dispositivos para ver se o dispositivo de destino está acessível através de uma conexão direta LoRaWAN. Caso contrário, a mensagem de downlink será encaminhada para o próximo gateway. As mensagens de downlink no LoRaWAN sempre usam os mesmos gateways que transportaram a mensagem de uplink correspondente. Assim, o próximo salto para mensagens de downlink pode ser gravado na tabela de dispositivos à medida que as mensagens de uplink são processadas. Para cada mensagem de uplink recebida de outro gateway, o endereço do dispositivo é armazenado na tabela de dispositivos, com o ID do nó do gateway de envio como o ID do nó de destino correspondente (Lundell et al., 2018). O formato do pacote é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Formato do pacote de dados.



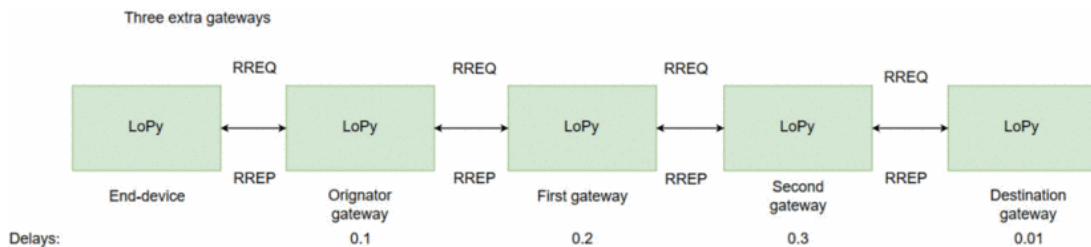
Fonte: Lundell et al. (2018)

O protocolo opera com o gateway ouvindo constantemente as mensagens do dispositivo final. Quando o gateway recebe um pacote, ele verificará se possui um caminho válido para o nó de destino e, se houver, encaminha o pacote. Se esse caminho não existir, o gateway executará a descoberta de rotas. Para fazer isso, ele envia uma mensagem RREQ

com o endereço de destino e aguarda uma mensagem RREP. Quando essa mensagem for recebida, o gateway armazena a rota em sua tabela de roteamento e o endereço do dispositivo final na tabela de dispositivos (Lundell et al., 2018).

Cada gateways subsequente ao longo do caminho do downlink verifica se é o destino e, se não, encaminha o pacote após a atualização do campo de salto anterior. Se for o destino, ele apaga a entrada do dispositivo na tabela de dispositivos e decapsula o pacote de dados em um pacote compatível com LoRaWAN antes de transmiti-lo ao dispositivo final. Esse processo é mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Topologia de rede das experiências em laboratório.



Fonte: Lundell et al. (2018)

O protocolo proposto adiciona 44 bytes extras que devem ser transmitidos por gateway. Para comparação, o cabeçalho LoRaWAN adiciona 13 bytes a cada pacote de dados. O roteamento, portanto, requer um aumento significativo no *overhead* de controle por salto, no entanto, isso é atenuado pelo fato de que as redes LoRa normalmente têm um diâmetro de rede baixo nos saltos, devido ao longo alcance possível para cada salto. (Lundell et al., 2018)

Neste artigo (Lundell et al., 2018), foi apresentado um novo protocolo de roteamento, baseado em AODV e HWMP, para fornecer transmissão multihop em redes LoRa. Resta, no entanto, trabalho a ser feito para fornecer um protocolo completo. Vários recursos presentes no AODV e no HWMP para lidar com falhas de rota, como erros de rota, temporizadores de rota e reconhecimentos, ainda não foram implementados nesse protocolo. O principal cuidado a se tomar que tem-se um aumento significativo no header do protocolo ao se comparar com o LoRaWAN, sendo que o LoRaWAN já tem uma carga útil muito limitada, dessa forma muitas aplicações não serão compatíveis com esse protocolo, mas a ideia é bem interessante e merece mais estudo a respeito do tema.

3.3.2 Melhoria da confiabilidade do LoRa com ARQ e nó de retransmissão

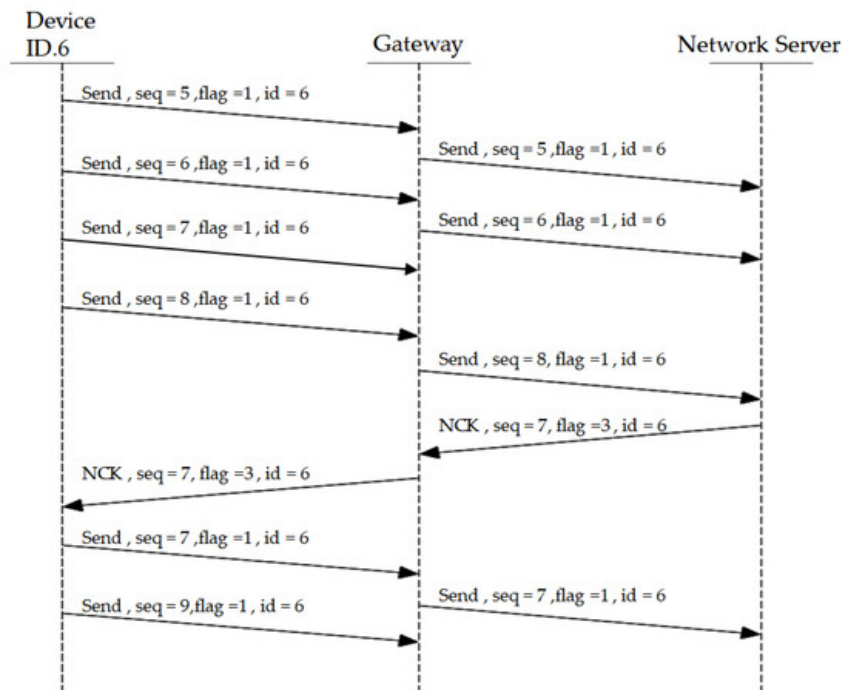
Neste artigo os autores propõem duas soluções tanto para cidades como para ambientes rurais com muitos obstáculos que por sua vez ocasiona muita perda de pacotes LoRa, a primeira solução é um método multihop, e a segunda um sistema de solicitação

de repetição automática (ARQ), que detecta a perda de pacotes em tempo real e solicita retransmissão para LoRa.

Na proposta de implantação do ARQ no LoRa, leva a uma maior confiabilidade LoRa, com menos sobrecarga. O LoRa é geralmente usado em ambiente da Internet das coisas, que é uma rede de sensores sem fio (WSN). O WSN deve considerar duas coisas. Primeiro é o processo mínimo. Por ser um dispositivo incorporado, por padrão, deve funcionar sem problemas. O segundo é o seu consumo de energia. Um método que não afeta a vida útil da bateria deve ser usado. Portanto, é mais eficiente enviar pacotes não confirmados (NCK), deixando o envio de pacotes confirmados(ACK), somente aos pacotes que foram perdidos(CHOI; LEE; LEE, 2020).

Já no protocolo ARQ de repetição seletiva, o dispositivo envia dados periodicamente para o gateway que por sua vez passa para o servidor de rede. Aqui, o dispositivo e o gateway se comunicam usando a modulação LoRa, enquanto o gateway e o servidor estão conectados como backhaul. Nesse processo, o dispositivo final armazena os pacotes que foram enviados em memória para retransmitir, se assim lhe for solicitado. Pacotes que foram retransmitidos são descartados. A repetição seletiva é usada como uma técnica de retransmissão. Quando um pacote perdido é solicitado, o servidor de rede envia as informações do dispositivo e as informações de pacotes necessárias. O dispositivo recebe qual o pacote que foi pedido e o retransmite (CHOI; LEE; LEE, 2020).

Figura 3.9 – Diagrama de sequência com perda de pacotes.



Fonte: Choi, Lee e Lee (2020)

Na Figura 3.9 , se os pacotes 5 e 6 são recebidos normalmente e o pacote 8 chega

antes do que o pacote 7, o pacote 7 é detectado como perdido. Dessa forma o servidor de rede envia ao gateway as informações ao dispositivo que o pacote 7 foi perdido. O gateway verifica as informações do pacote 7 para retransmitir. O dispositivo retransmite o pacote 7 e o exclui da memória (CHOI; LEE; LEE, 2020).

O sistema implementado de nó multi-salto e ARQ associados ao LoRa é bastante desafiador. Para aplicar o método proposto foram utilizadas plataformas com código aberto e hardware aberto. O processo de retransmissão foi implementado com base no RSSI, com a minimização do processo de operação do nó final. Como resultado da aplicação de ambos, observou-se que a taxa de entrega de pacotes aumentou de 30% para pouco mais de 94% no campus internacional da Universidade Kyung Hee(CHOI; LEE; LEE, 2020).

4 DESENVOLVIMENTO

A proposta deste trabalho é desenvolver um Nó Híbrido que utilize a tecnologia LoRa trabalhando sobre o protocolo LoRaWAN, funcionando como um Nó LoRaWAN Básico, mas com funcionalidade de repetidor de pacotes LoRaWAN integrado. Auxiliando na retransmissão de pacotes de dispositivos que estejam com baixa taxa de entrega ou até mesmo para a extensão da rede LoRaWAN com um baixo custo agregado, dessa forma contribuindo para o aumento da confiabilidade da rede.

O Nó Híbrido LoRaWAN foi desenvolvido com base no microcontrolador ATmega328P, chip LoRa RFM95, sensor de temperatura digital DS18B20 e uma saída digital. O sensor de temperatura e a saída digital servem como prova de conceito que o nó consegue enviar e receber dados pela rede LoRaWAN, enquanto funciona como repetidor. O Nó Híbrido LoRaWAN também conta com bateria integrada, assim funcionando como *backup* nas eventuais faltas de energia elétrica.

Neste capítulo é apresentado o ambiente de desenvolvimento utilizado, também é apresentado todo o desenvolvimento tanto de hardware quanto de software embarcado, bem como suas funcionalidades, além de ser apresentado o que é desenvolvido e implementado, para se obter o protótipo funcional e ao final uma levantamento de custo do Nó Híbrido LoRaWAN desenvolvido.

4.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

O ambiente de desenvolvimento é uma ferramenta de grande importância no desenvolvimento de qualquer projeto, por esse motivo o desenvolvedor deve se atentar na escolha do mesmo, deve-se levar em conta principalmente as funcionalidade e ferramentas que venham agregar e acelerar o desenvolvimento do projeto.

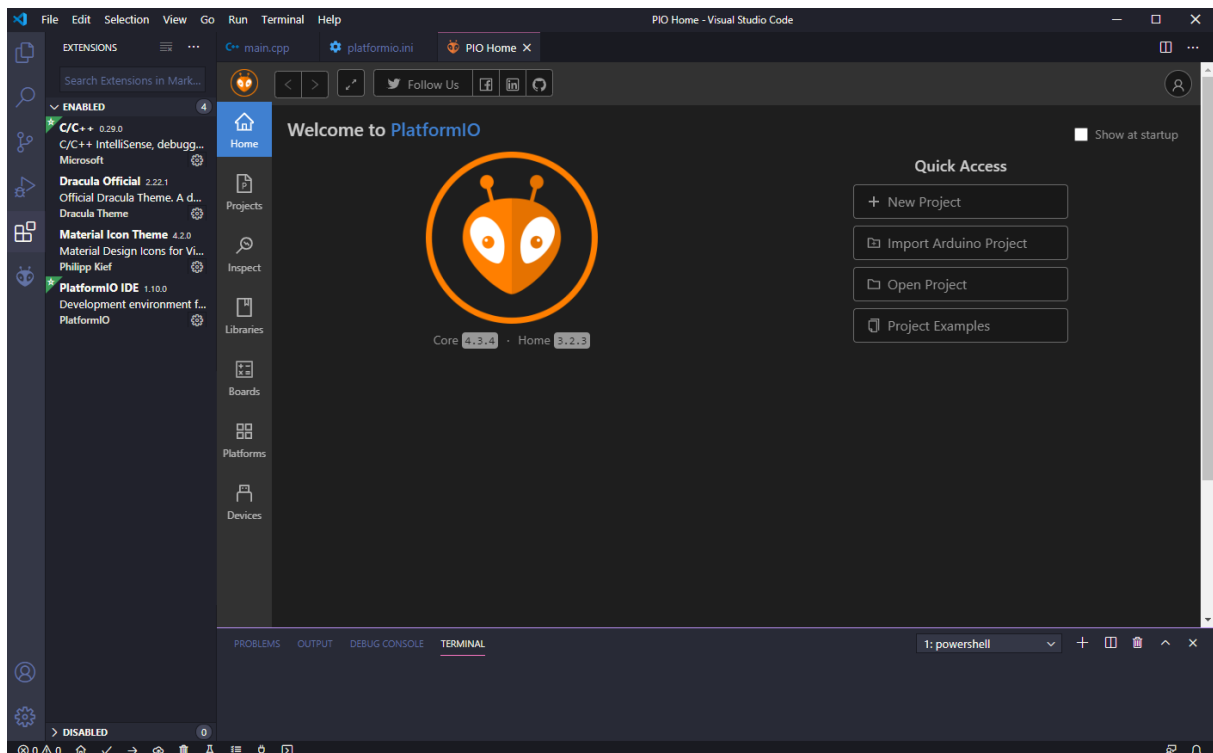
Para o desenvolvimento do projeto do Nó Híbrido LoRaWAN foi utilizado o software VSCode (*Visual Studio Code*) que é um programa *Open-Source* desenvolvido pela Microsoft, sendo ele um software livre e de código aberto, altamente customizável, permitindo que o usuário altere aspectos visuais, instale extensões e com suporte a diversas linguagens de programação incluindo o C e C++ que são utilizadas no projeto. Entre as principais funcionalidades do VSCode que ajudam na produtividade do programador está:

- *Intellisense* (Sintaxe Inteligente);
- *Debug* integrado;
- Terminal integrado;

- Git incorporado;
- Enorme quantidade de extensões disponíveis.

Em conjunto com VSCode foi utilizado o PlatformIO IDE que é um ecossistema de código-aberto como suporte a diversos tipos de placas e microcontroladores, entre elas Arduino, NodeMCU, Raspberry Pi e muitas outras, assim permitindo que se utilize uma única ferramenta de desenvolvimento para diferentes microcontroladores tornando o projeto portátil para outras plataformas de desenvolvimento. PlatformIO IDE é instalado através do gerenciando de pacotes do VSCode. O ambiente de desenvolvimento completo VSCode + PlatformIO IDE é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Ambiente de desenvolvimento VSCode + PlatformIO IDE.



Fonte: Autor.

4.2 DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE

Para o desenvolvimento do Nó Híbrido LoRaWAN, é utilizado o microcontrolador ATmega328P como base, juntamente com módulo RFM95 que envia os dados de temperatura do sensor digital DS18B20, nível de bateria e estado da saída digital, também recebe os pacotes de acionamento da saída digital via rede LoRaWAN, sendo ele também o responsável pelo reenvio/repetição de pacotes LoRaWAN. Nesta seção, são explanados

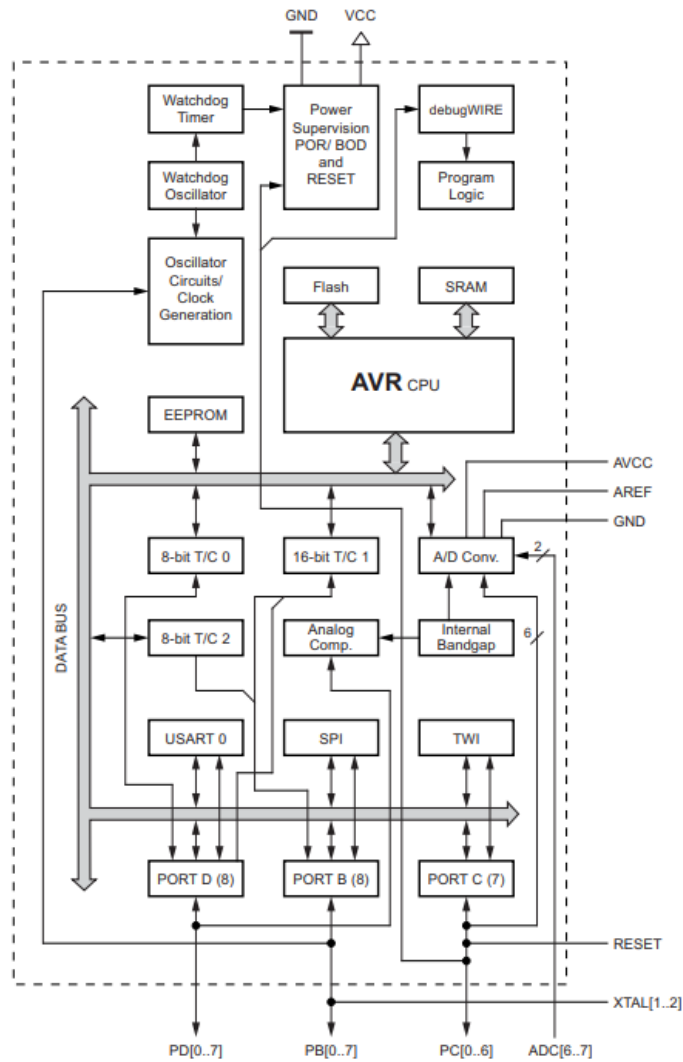
todos os materiais utilizados para a concepção do hardware, sendo abordado: sensor de temperatura, projeto do diagrama esquemático, placa de circuito impresso, antena externa, bateria de *backup*, entre outros tópicos.

4.2.1 Microcontrolador Embarcado ATmega328P

Este é o componente responsável pelo controle dos dispositivos utilizados, bem como efetuar a comunicação com o módulo LoRa e periféricos. Existem vários fatores importantes que devem ser considerados na escolha do microcontrolador a ser utilizado, como: material e documentação disponível, ambiente de desenvolvimento, preço e características de hardware, entre outros.

O ATmega328P baseado na arquitetura AVR foi o microcontrolador escolhido para o projeto. O que motivou a escolha do mesmo, é a grande quantidade de material disponível e também o desafio de implementar a *Stack LoRaWAN* mais o processo de repetição de pacotes em um microcontrolador com apenas 2K Bytes de memória RAM e 32K Bytes de memória flash. A arquitetura do microcontrolador ATmega328P é apresentado na Figura 4.2.

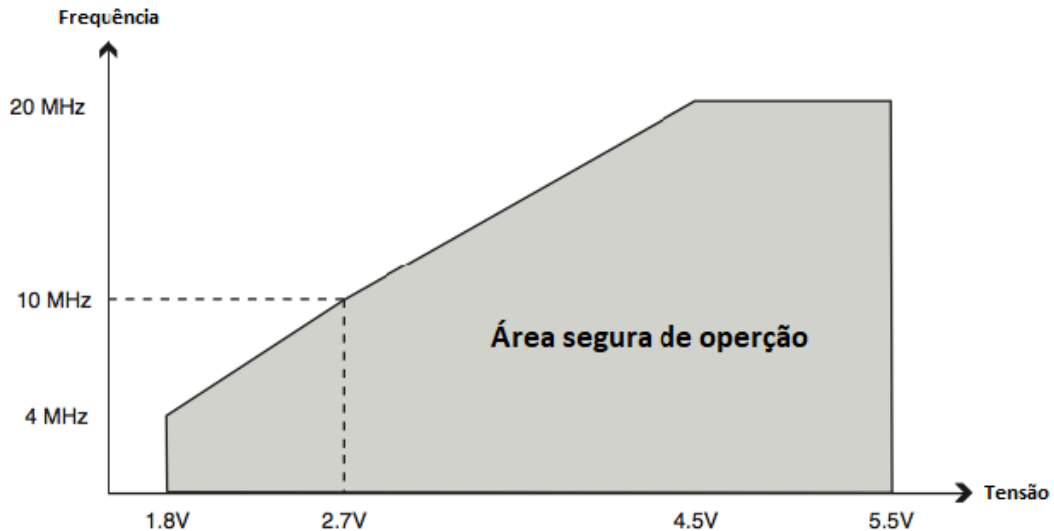
Figura 4.2 – Arquitetura do microcontrolador ATmega328P (AVR).



Fonte: Atmel/Microchip (2020).

Um detalhe importante a se mencionar, é que o microcontrolador utiliza cristal de 8 MHz, pelo motivo que o projeto utiliza bateria Lipo, que fornece tensões na faixa de 3V a 4,2V, o que sugere Atmel/Microchip (2020) que a frequência de operação esteja na faixa de operação segura. O gráfico de área de operação segura do ATmega328P frequência x tensão é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Zona de operação segura do microcontrolador ATmega328P.



Fonte: Atmel/Microchip (2020).

Uma técnica muito utilizada quando se tem bateria como fonte de alimentação de circuitos é ativar o *Brown Out* (BOD) do microcontrolador. A tensão de ativação do BOD é de 2,7V, isso colocará o microcontrolador no modo de *reset* se a tensão no pino alimentação (VCC) cair abaixo do limite. Quando a tensão de alimentação voltar a subir acima do limiar por um período mínimo de tempo, o microcontrolador sairá do *reset* e começará a executar o código principal, semelhante a uma inicialização normal, com isso evitando que o microcontrolador trabalhe fora da zona segura em uma eventual queda na tensão da bateria, evitando que o mesmo opere em um estado indefinido e trave o código principal.

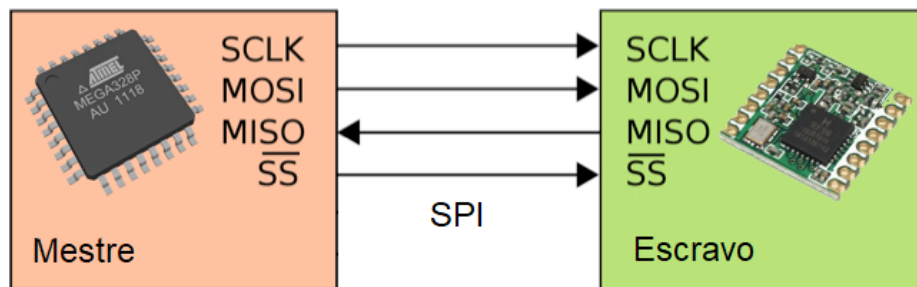
4.2.2 Chip Transceiver LoRa RFM95

O módulo utilizado é o RFM95 que contém o chip sx1276 produzido e patentado pela **Semtech** que atualmente detém os direitos de fabricação do mesmo, esse é responsável pela modulação LoRa. O RFM95 por ser um módulo focado em baixo consumo e transmissão a longas distâncias, drena uma corrente de 0,2 uA em modo de hibernação, já em picos drena uma corrente de 120 mA quando está em modo de transmissão com potência máxima de +20 dBm, porém por um curto período. O módulo possui uma alta sensibilidade de recepção, cerca de -148 dBm, o que é muito importante para detectar pacotes LoRaWAN que estejam com baixa potência e reenvia por meio do Nó Híbrido LoRaWAN se assim for necessário.

A comunicação do RFM95 com o microcontrolador se dá através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), que obedece à arquitetura mestre/escravo, onde microcon-

trolador ATmega328P (dispositivo mestre) e o dispositivo escravo (RFM95) se comunicam a uma velocidade de 8 MHz no barramento SPI. O diagrama de funcionamento do ATmega328P com RFM95 no barramento SPI é mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Diagrama de funcionamento do ATmega328p com RFM95 no barramento SPI.



Fonte: Autor.

Onde a nomenclatura dos pinos SPI são:

- MISO: Entrada do Mestre, Saída do Escravo (*Master In Slave Out*) linha em que o escravo manda informações para o mestre;
- MOSI: Saída do Mestre, Entrada do Escravo (*Master Out Slave In*) linha em que o mestre manda informações para os escravos;
- SCLK: Clock do sistema (*System Clock*) pulsos de clock que sincronizam a transmissão de dados gerada pelo mestre;
- SS: Seleção de Escravo (*Slave Select*) pino no qual o mestre habilita a comunicação. Com isso, é possível utilizar diversos dispositivos compartilhando os mesmos pinos de MISO, MOSI e SCK, cada um atuando por vez.

4.2.3 Sensor e Atuador Integrados

O Nó Híbrido LoRaWAN conta com sensor de temperatura e saída digital integrada. Com esses elementos se tem a prova de conceito que o mesmo pode enviar e receber dados pela rede LoRaWAN, juntamente retransmitindo pacotes LoRaWAN quanto assim for necessário.

O Nó Híbrido LoRaWAN conta com um sensor de temperatura à prova d'água modelo DS18B20. O sensor possui resolução de 9 a 12 bits (configuráveis) para leituras de

temperatura, funcionando com o protocolo *OneWire*, aferindo temperaturas na faixa de -55 °C a 125 °C. O sensor utilizado no projeto é mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Sensor de temperatura DS18B20.



Fonte: Autor.

O Nó Híbrido LoRaWAN conta também com uma saída digital, composta por uma chave digital do tipo transistor de efeito de campo (FET), com nível lógico de 3,3 a 4,2 V com uma capacidade de fornecer 500 mA de carga. Para melhor usabilidade a saída digital conta com LED indicativo de acionamento. A saída digital e o LED indicador de acionamento são apresentados na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Saída digital e indicador de acionamento.



Fonte: Autor.

4.2.4 Bateria de Backup

A bateria de backup pode manter o Nó Híbrido LoRaWAN em pleno funcionamento por um período mesmo na ausência de energia da fonte principal de alimentação (Fonte DC/DC). A bateria utilizada é de Li-Po recarregável fornecendo uma tensão de 3,7 V com capacidade de 1000 mAh, ou seja, pode manter uma corrente de 1000 mAh por até uma hora de funcionamento. A bateria utilizada no projeto é apresentada na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Bateria de Li-Po 3,7 V 1000 mAh.



Fonte: Autor.

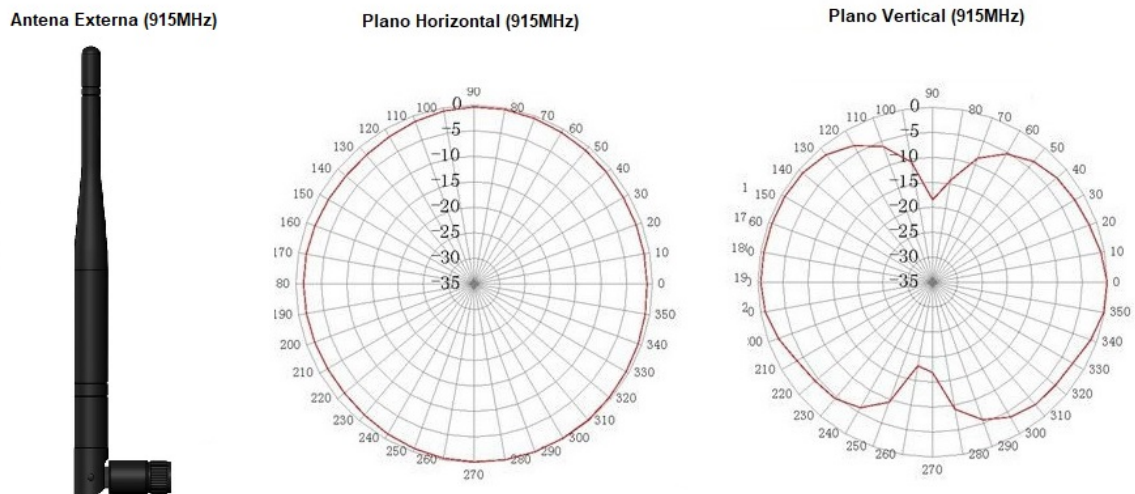
A bateria de backup fornece energia ao circuito somente em caso de interrupção da fonte principal de alimentação. A bateria mantém-se recarregando continuamente a partir de um circuito de controle e carga que faz esse gerenciamento.

4.2.5 Antena Externa

No projeto do Nó Híbrido LoRaWAN é utilizado antena omnidirecional de 3 dBi para uso externo, operando na frequência central de 915 MHz.

O uso de uma antena omnidirecional externa, faz com que o sinal seja transmitido em todas as direções na horizontal, mas o ângulo vertical se torna mais estreito, ou seja, a antena faz com que o sinal concentre a transmissão em uma faixa mais estreita. O diagrama de radiação polar da antena utilizada é mostrada na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Diagrama de radiação polar da antena utilizada (Horizontal e Vertical).



Fonte: Autor.

4.2.6 Diagrama Esquemático e Placa de Circuito Impresso

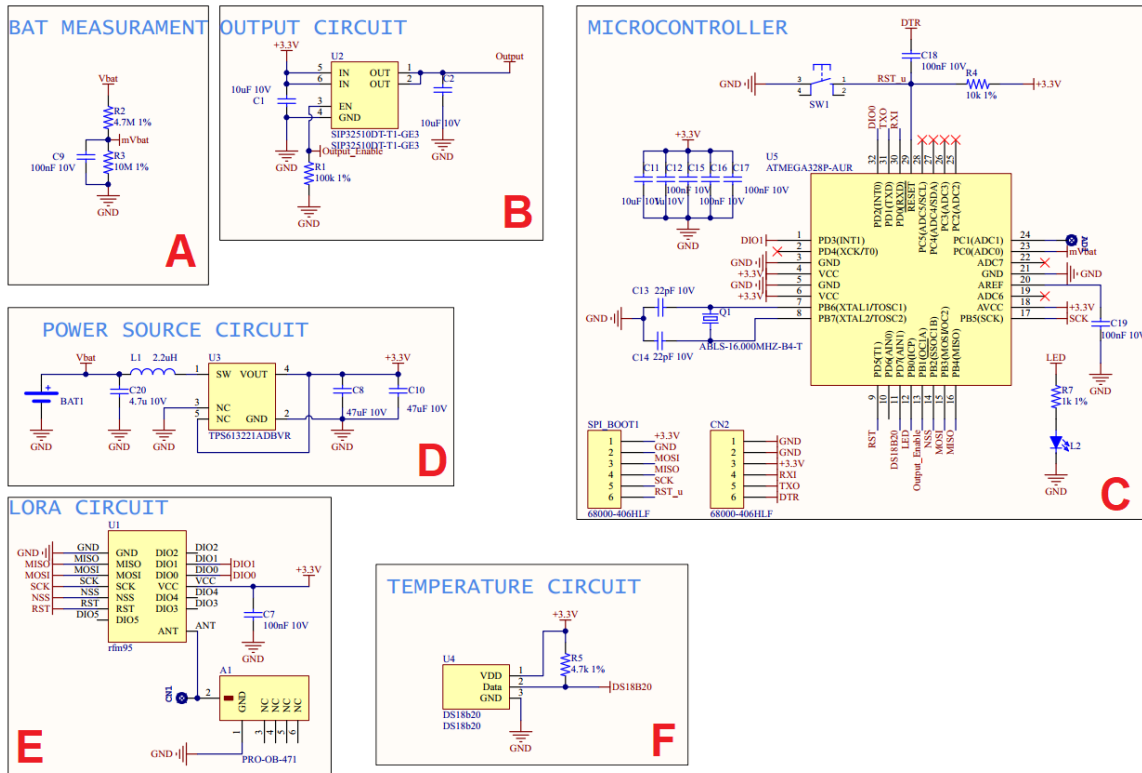
O diagrama esquemático, assim como o layout da PCI (Placa de circuito impresso), foi elaborado com software de designer PCB.

O diagrama esquemático completo é apresentado na Figura 4.9. O projeto é dividido em setores, que são eles:

- **Circuito de medição de bateria (A):** Medição do nível da bateria é realizado por meio de um divisor de tensão composto por um resistor de $4,7M\Omega$ e um de $10M\Omega$;
- **Saída digital (B):** A saída digital é controlada pelo driver de potência SIP32510, o qual tem como base transistores de efeito de campo (FET) com capacidade de corrente de 500 mA, o que permite ao usuário ligar cargas diretamente na saída digital sem a necessidade de instrumentação extra.
- **Microcontrolador (C):** O microcontrolador ATmega328P trabalhando a uma frequência de 8 MHz, executa o software embarcado, fazendo o gerenciamento tanto o hardware quanto o software;
- **Circuito regulador de tensão (D):** O circuito regulador de tensão é responsável por adequar o nível de tensão da bateria de 4,2V para 3,3 V. O circuito integrado boost TPS6132 é o principal componente que regula a saída em 3,3 V, podendo ter níveis de tensão de entrada de 0,9 V a 5,5 V, mesmo com variações de tensão na entrada a saída permanece em 3,3 V constante;

- **Módulo LoRa (E):** O módulo RFM95 é responsável pela comunicação LoRa, esse se comunica com o microcontrolador através do protocolo SPI;
- **Medição de temperatura externa (F):** Para essa função é utilizado o sensor digital DS18B20, o qual se comunica com o microcontrolador através do protocolo *OneWire*.

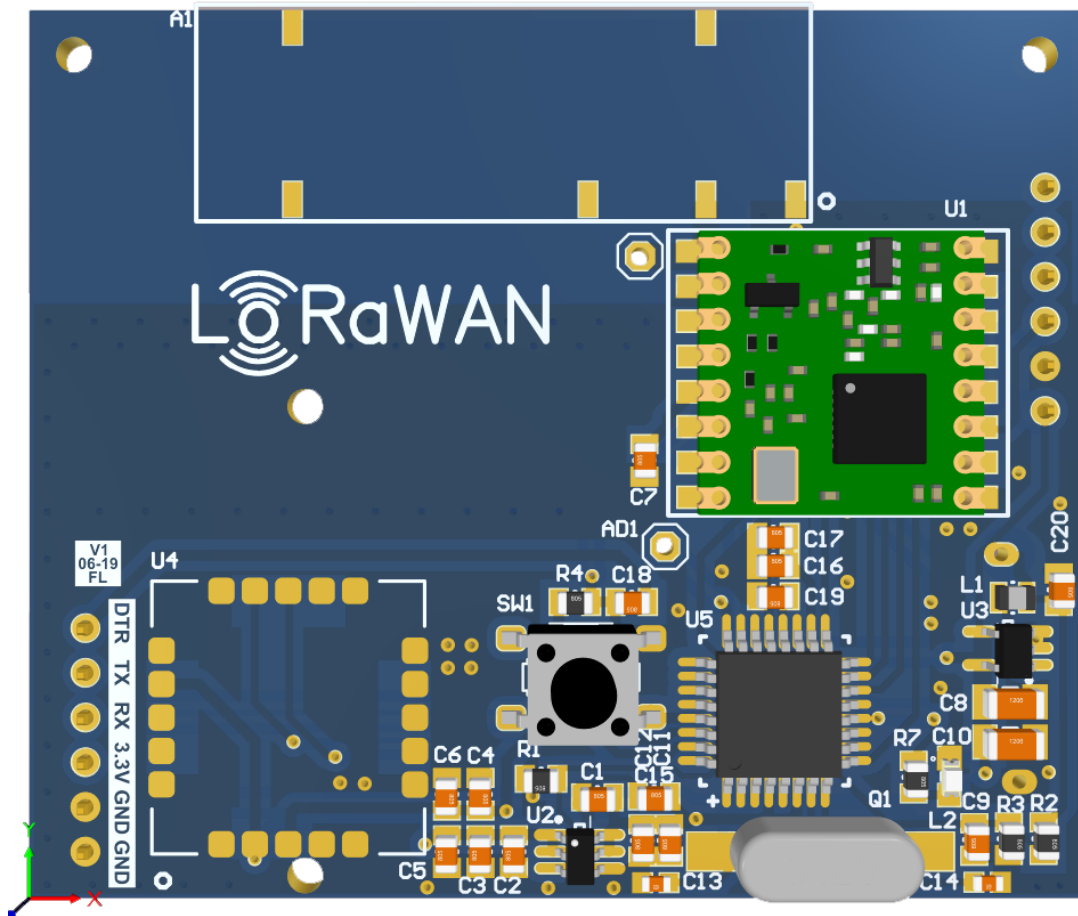
Figura 4.9 – Diagrama Esquemático Completo do Nó Híbrido LoRaWAN.



Fonte: Autor.

Após o projeto do diagrama esquemático ponto, foi montada a placa de circuito impresso. O resultado final da placa de circuito impresso 3D é mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Placa de Circuito Impresso 3D do Nó Híbrido LoRaWAN.



Fonte: Autor.

O levantamento de preço de hardware do Nó Híbrido LoRaWAN, incluindo todo o material utilizado no projeto é apresentado no Anexo A.

4.3 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE EMBARCADO

Nessa seção serão descritos em detalhes a arquitetura de firmware embarcado desenvolvido, assim como tecnologia e linguagem utilizadas, bem como os processos envolvidos.

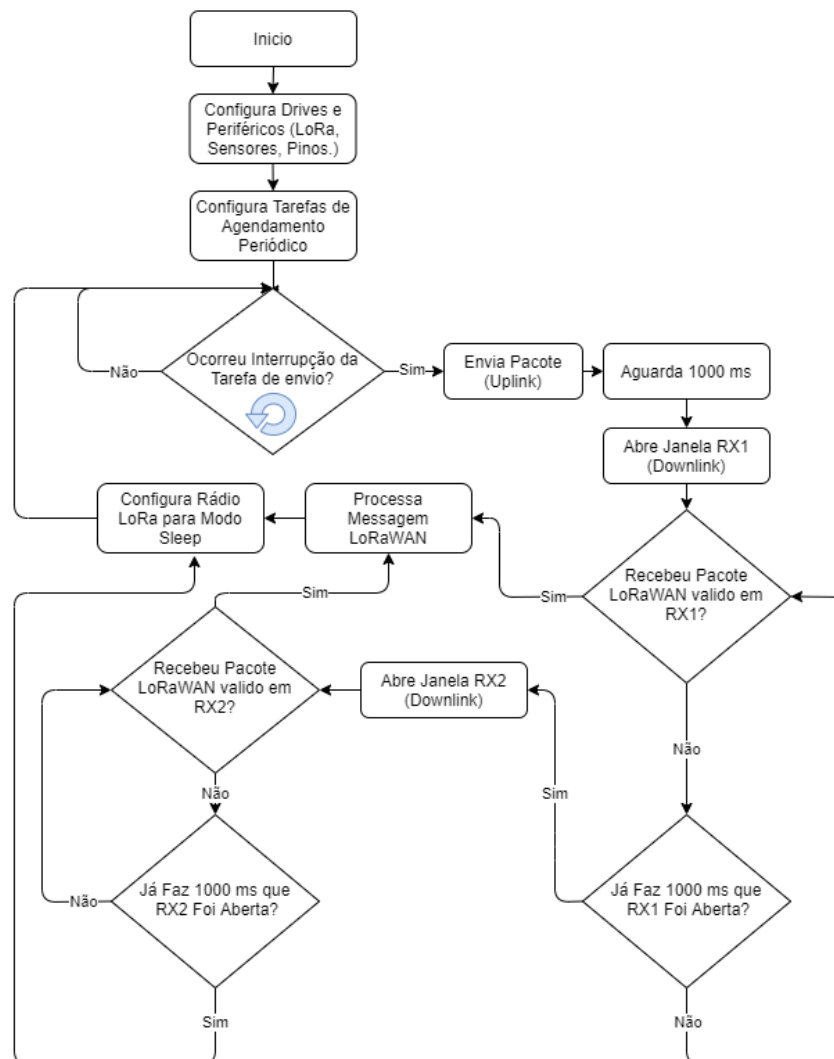
O Nó Híbrido LoRaWAN pode ser dividido em basicamente dois processos distintos, o primeiro processo que controla as função do Nó LoRaWAN Básico e o segundo processo cuida da gestão dos pacotes LoRaWAN a serem repetidos/retransmitidos.

4.3.1 Implementação do Nó LoRaWAN Básico

A implementação do Nó LoRaWAN Básico deve estar de acordo com protocolo LoRaWAN de maneira que o mesmo se integre com a rede LoRaWAN. O Nó LoRaWAN Básico conta com autenticação na rede LoRaWAN por ABP (*Activation by personalization*) ou OTTA (*Over the air activation*), operando em classe A, suportando pacotes de uplink periódicos configuráveis e pacotes de downlink.

O funcionamento do Nó LoRaWAN Básico sempre se inicia quando um pacote é enviado por meio do uplink, imediatamente ao término do envio uma janela RX1 é aberta, pelo mesmo, para o recebimento de dados de downlink. A duração dessa janela tem que ser, pelo menos, de mesmo valor que o tempo necessário para que o módulo LoRa (RFM95) detecte um preâmbulo do protocolo LoRaWAN de downlink. Se, nesse período, for detectado pelo Nó um preâmbulo, o mesmo continua escutando até que o pacote seja recebido por completo. Se nenhum pacote for recebido na janela RX1, o Nó abre uma nova janela, RX2, que se comporta da mesma forma que RX1, porém em uma frequência fixa diferente de RX1. O funcionamento detalhado do Nó LoRaWAN Básico é apresentado em forma de fluxograma na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Fluxograma do processo do Nó LoRaWAN Básico (Parte do Nó Híbrido LoRaWAN).

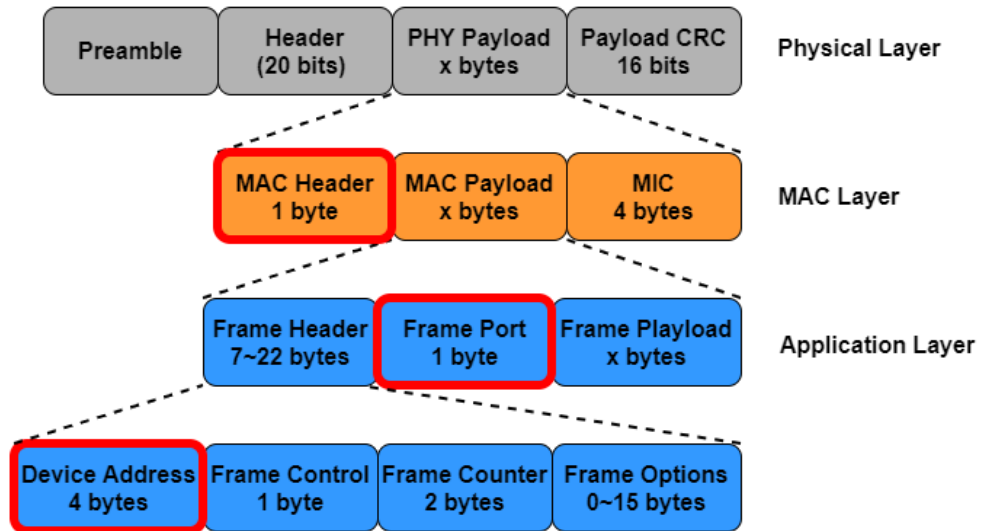


Fonte: Autor.

4.3.2 Implementação do Repetidor LoRaWAN

Para entendermos o funcionamento do processo de repetição de pacotes do Nó Híbrido LoRaWAN, precisamos analisar a estrutura do *frame LoRa*, dessa forma, o protocolo LoRaWAN consiste em uma camada MAC (*Media Access Control Layer*) e uma camada de aplicação (*Application Layer*) que operam sobre a camada física LoRa (*Physical Layer*). As camadas do frame LoRa: Physical Layer, MAC Layer e Application Layer são mostradas de forma estrutural na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Estrutura das camadas do frame LoRa: Physical Layer, MAC Layer e Application Layer.



Fonte: Autor.

Onde:

- **Physical Layer:** O *preamble* define o padrão de modulação do pacote LoRa, o *Header PHY* tem um CRC implícito que, juntos, têm 20 bits. Basicamente o Header tem informações de parametrização do pacote, já o *Payload PHY* é a carga útil do pacote, com 2 bytes de *payload CRC*, que serve para verificar a integridade do pacote;
- **MAC Layer:** O *MAC Header* define a versão do protocolo e o tipo de mensagem, ou seja, se é um frame de dados ou de gerenciamento. Se o pacote é de uplink ou downlink, se deve ser confirmado ou não. Esse parâmetro é de grande importância no processo de repetição de um pacote LoRaWAN, pois é através dele que se tem o controle de direção dos pacotes LoRa. O *MAC Payload* é a carga útil do MAC, já o valor *MIC* que é usado para validar a mensagem LoRaWAN, assim evitando alteração da mesma no meio do caminho;
- **Application Layer:** o *Frame Header* contém informações do *Device Address* que é o endereço de rede do dispositivo final, esse parâmetro faz parte do processo de repetição de pacotes, servindo de filtro de quais dispositivos finais devem ter seus pacotes repetidos, o *Frame Control* tem informações de controle de rede, como se deve usar a taxa de dados especificada pelo gateway para transmissão de uplink, se a mensagem corrente deve ser confinada pelo dispositivo final, potência de transmissão e validação de conexão, etc essas alterações são mais conhecidas por MAC

commands, *Fame Port* tem como função de separar as informações de um mesmo dispositivo final, usado como filtro de dados, exemplo se no mesmo dispositivo final tiver valores de temperatura e unidade podemos mandar essas informações em portas diferentes assim facilitando a separação desses dados pelo servidor de rede, esse parâmetro também é usado como filtro de repetição de pacotes pelo Nó Híbrido LoRaWAN, desse forma podemos configurar na rede LoRAWAN em uma porta específica de repetição de pacotes, e por fim o *Fame Payload* que tem a informação útil do pacote LoRAWAN sendo que esse parâmetro é criptografado com AES 128.

O processo de repetição de pacotes do Nó Híbrido LoRaWAN é baseado nos parâmetros *MAC Header*, *Frame Port* e *Device Address* (Circulados em vermelho na Figura 4.12).

O *MAC Header* é composto por 1 byte que é utilizado para identificar a direção do pacote LoRAWAN, apresentado na Tabela 4.1. O módulo LoRa é configurado de forma que receba o pacote a ser repetido e imediatamente reconfigure o módulo para retransmitir o mesmo de forma adequada, em resumo ora o Nó Híbrido LoRaWAN funciona como gateway LoRaWAN recebendo os pacotes e reenviando para os dispositivos finais, ora como dispositivo final reenviando os pacotes para o gateway. O processo é controlado pelo valor recebido no *MAC Header*, sendo que o Nó Híbrido LoRaWAN funciona de forma totalmente transparente na rede LoRaWAN sem a necessidade de nenhum ajuste extra.

Tabela 4.1 – Identificador de direção do pacote LoRaWAN.

<i>MAC Header</i>	Direção
0x40	Uplink não confirmado
0x80	Uplink confirmado
0x60	Downlink não confirmado
0xA0	Downlink confirmado

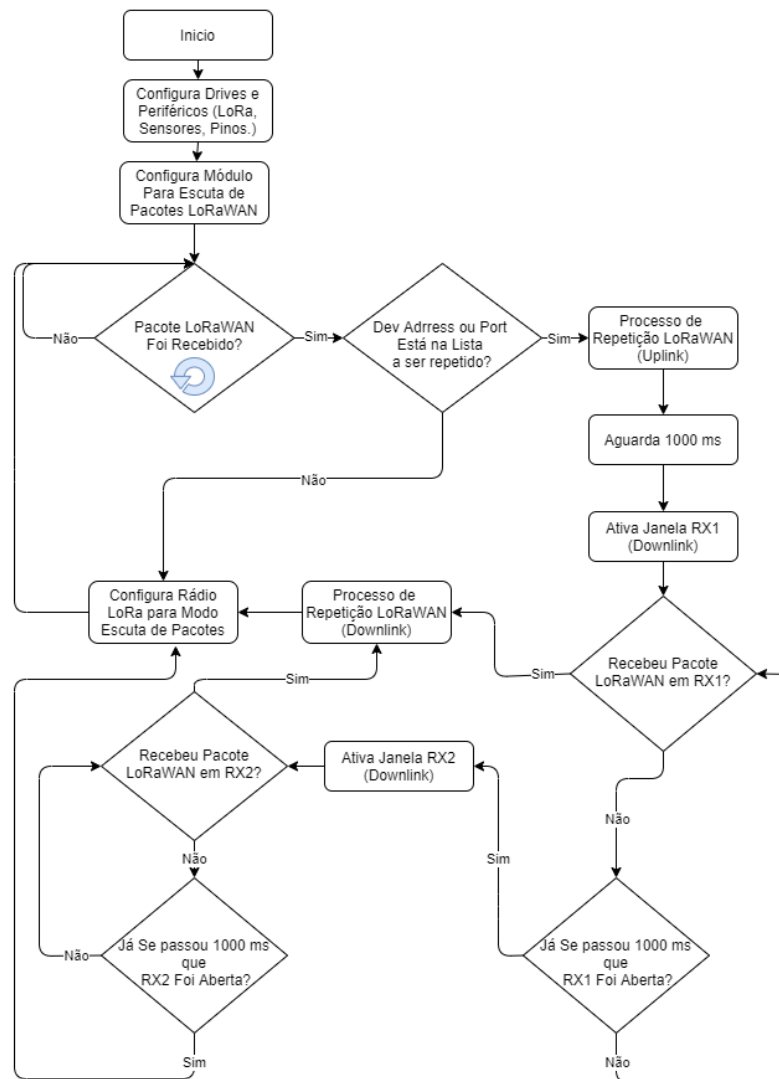
Fonte: Autor.

O *Device Address* e *Frame Port* de modo geral funciona como filtro selecionado quais os endereços de rede ou porta que terão seus pacotes repetidos. Esses filtros são de suma importância pois o usuário tem a liberdade de configurar somente os dispositivos finais que tem a real necessidade de ter seus pacotes repetidos, assim evitando sobrecarga na rede LoRaWAN, causada por repetições de pacotes desnecessárias.

O funcionamento do repetidor LoRaWAN se inicia com a chegada de pacotes LoRaWAN, ou seja, o módulo LoRa é configurado inicialmente no modo escuta de pacotes. Quando um pacote LoRaWAN for recebido esse é verificado se está na lista (lista que contém os DevIDs liberados para repetição) de endereços liberados ou em uma porta liberada (Fport que foi configurada com porta de repetição, se habilitada), se sim, imediatamente ele é retransmitido/repetido, ao término da retransmissão uma janela RX1 é aberta, pelo mesmo, para o recebimento de dados de downlink vindos do gateway, se um pacote for

recebido esse também é repetido. A duração dessa janela normalmente é de um segundo. Se nenhum pacote for recebido na janela RX1, o repetidor abre uma nova janela, RX2, que se comporta da mesma forma que RX1. O funcionamento detalhado do Repetidor LoRaWAN é apresentado em forma de fluxograma na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Fluxograma do processo do Repetidor LoRaWAN (Parte do Nó Híbrido LoRaWAN).



Fonte: Autor.

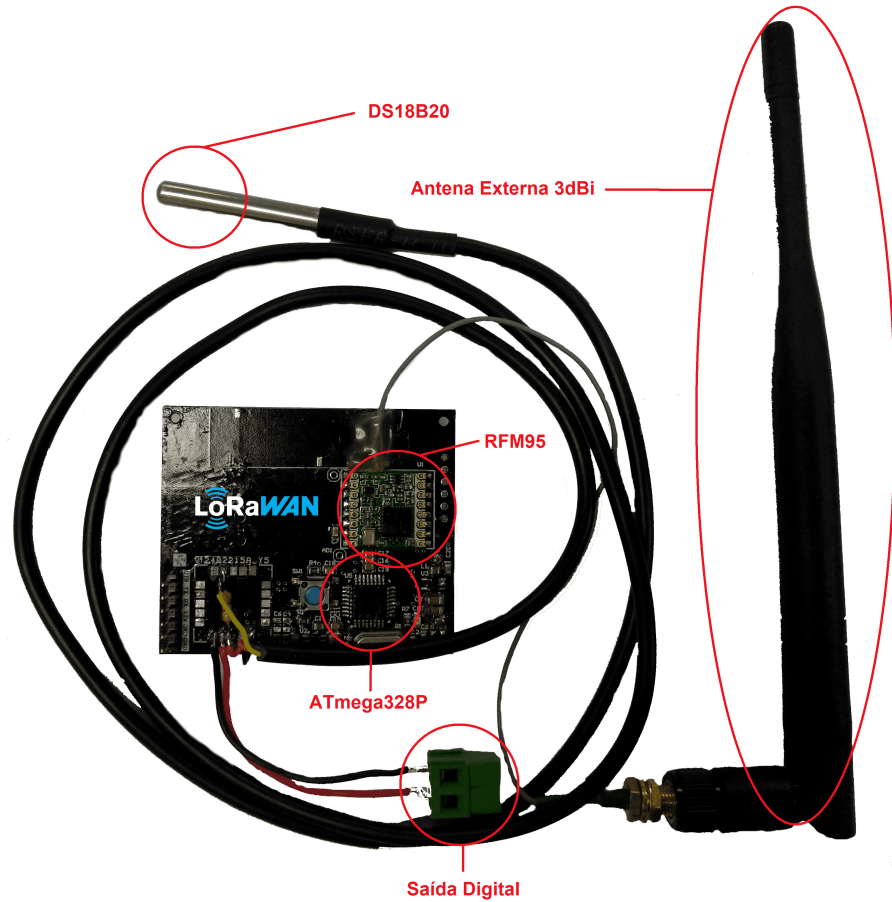
4.3.3 Nó Híbrido LoRaWAN Completo

A junção do Nó LoRaWAN Básico com o Repetidor LoRaWAN dá origem ao Nó Híbrido LoRaWAN completo já apresentados nas seções 4.3.1 e 4.3.2.

Após o projeto de hardware e software embarcados finalizados, foi montada a placa

de circuito impresso, juntamente com os componentes eletrônicos. O projeto real do Nó Híbrido LoRaWAN e seus periféricos é apresentada na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Placa PCI e periféricos do Nó Híbrido LoRaWAN



Fonte: Autor.

Após os testes bem sucedidos placa, periféricos e a bateria de backup, foram alocados em uma caixa plástica Patola PB-075 35x60x75mm, onde os circuitos ficam protegidos de fatores ambientais, como chuva e poeira, tornando fácil a sua instalação. O Nó Híbrido LoRaWAN é apresentada na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Nó Híbrido LoRaWAN.



Fonte: Autor.

4.3.4 Parametrização do Nó Híbrido LoRaWAN via Comandos AT's

Pensando em um produto final e de fácil usabilidade, foi implementado uma série de comandos de configuração do Nó Híbrido LoRaWAN com uma sintaxe própria baseados em comandos AT's de fácil utilização.

Os comandos AT's (onde AT vem de *attention*, em português atenção) funcionam sobre a UART (*Receptor/Transmissor Universal Assíncrono*), mas conhecida como serial do microcontrolador na velocidade de 9600 bps com auxílio de um conversor USB para serial TTL. Permitindo a interface de Nó Híbrido LoRaWAN para USB, podendo, assim, ser configurado diretamente pelo computador com um terminal serial comum.

A lista de comandos AT's e suas funções suportadas são:

- **AT**: Comando de teste de comunicação, se tudo estiver certo tem como resposta um *Ok*;

- **AT+DEVEUI:** Retorna o EUI único de 64 bits utilizado para cadastro do dispositivo no servidor de rede LoRaWAN;
- **AT+ABPKEY:** Comando de autenticação na rede pelo método ABP, é composto de 3 parâmetros separados por espaço entre si, o primeiro é *Device Address*, o segundo *Network Session Key* e o terceiro *App Session Key*, se nenhum valor for passado após o comando o retorno os parâmetros atuais de configuração;
- **AT+OTAAKEY:** Comando de autenticação na rede pelo método OTAA, é composto de 2 parâmetros separados por espaço entre si, o primeiro é *Application EUI* e o segundo *App Key*, se nenhum valor for passado após o comando o retorno é os parâmetros atuais de configuração;
- **AT+ACTIVATION:** Comando de seleção de método de autenticação OTAA ou ABP, é composto de 1 parâmetros separados por espaço, se for enviado o valor *0* será configurado como OTAA se for enviado *1* será ABP;
- **AT+CH:** Configuração de canal de envio de pacotes do Nó LoRaWAN, é composto de 2 parâmetros, o primeiro é o canal de início e o segundo canal de fim, são possíveis valores de 0 a 63, sendo que os valores do padrão Australiano são os utilizados no Brasil. Geralmente o canal de início *8* e o canal de fim *15* pertencentes a na sub-banda 2;
- **AT+DR:** Configuração de *Data Rate (DR)* de envio de pacotes, é composto de 1 parâmetro, que pode variar de *0* até *5* conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Configuração do DR com equivalência de SF e BW.

DR	SF	BW
0	12	125 kHz
1	11	125 kHz
2	10	125 kHz
3	9	125 kHz
4	8	125 kHz
5	7	125 kHz

Fonte: Autor.

- **AT+DELAYRX1:** Configuração do atraso da janela de RX1 de recepção de pacotes, é composto de 1 parâmetro, que pode ser de *1* até *10*, esse valor é expresso em segundos, sedo que RX2 é configurada automaticamente para abrir 1 segundo após o fechamento de RX1.
- **AT+INTERVAL:** Configuração do período de envio do pacote (temperatura , nível de bateria e estado da saída digital) do Nó LoRaWAN, é composto de 1 parâmetro, que pode ser configurado de *1* até *1440*, esse valor é expresso em minutos.

- **AT+RPSCANNER**: Comando que ativa o modo scanner de pacotes LoRaWAN, é composto de 1 parâmetro separado por espaço, se for enviado o valor *1* será ativado o modo scanner se for enviado *0* será desativado, quando ativado o usuário tem acesso ao: endereço de rede do dispositivo final, porta, tamanho do payload, potência do sinal recebido (RSSI), razão sinal ruído do sinal recebido (SNR), assim se tem como detectar em campo os dispositivos que estão ao alcance do Nó Híbrido LoRaWAN;
- **AT+RPCH**: Configuração de canal que terá os pacotes repetidos (se estiverem na lista de liberados ou porta), é composto de 1 parâmetro, são possíveis valores de *0* á *63*, o repetidor só pode repetir em um único canal;
- **AT+RPPOINT**: Configuração de porta que terá os pacotes repetidos, é composto de 1 parâmetros, são possíveis valores de *1* a *223*, se quiser desativar a repetição por porta é só usar o valor *255*;
- **AT+RPDR**: Configuração de *Data Rate (DR)* de repetição de pacotes LoRaWAN, é composto de 1 parâmetro, que pode variar de *0* até *5* conforme mostrado na Tabela 4.2.
- **AT+RPDEVLIST**: comando que adiciona endereço dos dispositivos finais a lista de liberados para ter seus pacotes repetidos. É composto de 2 parâmetros, o primeiro e o índice do endereço da lista, o segundo são os 4 bytes que compõem o endereço do dispositivo final (hexadecimal em formato de string), são permitidos no máximo 5 índices que variam de *0* até *4*, se for necessário remover da lista algum dispositivo final, deve inserir o valor do índice que contém o endereço a ser removido da lista seguido de *FFFFFFFF*;
- **AT+INFO**: Comando que retorna uma visão geral de como estão configurados todos os parâmetros do Nó Híbrido LoRaWAN;
- **AT+RESET**: Comando que reinicia o Nó Híbrido LoRaWAN, esse comando é recomendado ao final de uma configuração completa;

4.3.5 Parametrização do Nó Híbrido através Rede LoRaWAN

O Nó Híbrido LoRaWAN foi projetado para ser possível a configuração remota via rede LoRaWAN, assim, foi necessário criar um protocolo de dados que padronize as configurações básicas necessárias para alteração em campo sem a necessidade de deslocamento de equipe para efetuar essas alteração.

O protocolo foi elaborado utilizando os recursos que a própria rede LoRaWAN proporciona, dessa forma, alguns campos e portas foram reservados para a configuração remota via rede LoRaWAN. O protocolo de configuração possui quatro tipos de mensagem separados por portas. Essas mensagens de configuração são pacotes de downlink LoRaWAN, que utilizam as portas 1, 5, 10 e 15, sendo o conteúdo do *payload* as configurações separadas de byte em byte, com funções bem específicas, as porta 1 e 5 configuram parâmetros do Nó LoRaWAN Básico, já a porta 10 e 15 configuram parâmetros do Repetidor LoRaWAN.

A **saída digital** é acionada configurando o pacote de downlink na porta 1, se o primeiro byte do payload for 1 a saída digital é ativado se for 0 é desativado. A estrutura desse pacote é mostrada na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Estrutura do Pacote de Acionamento da Saída Digital.

The screenshot shows a configuration interface for a Downlink packet. Under 'Scheduling', there are buttons for 'replace', 'first', and 'last'. The 'FPort' field is set to '1' and is marked as 'Confirmed'. A red arrow points from 'FPort' to the text 'Porta'. The 'Payload' section has buttons for 'bytes' and 'fields', with the value '01' entered. A red arrow points from the payload to the text 'Saída Digital'.

Fonte: Autor.

Os parâmetros de configuração do Nó LoRaWAN Básico é através de um pacote de downlink na porta 5, composto de 4 bytes, sendo que o primeiro byte é o **Período de envio (Em minutos)**, o segundo **Data Rate (DR)**, o terceiro **Canal de Inicio de Envio** e o último **Canal de Fim de Envio**. A estrutura desse pacote é mostrada na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Estrutura do Pacote de configuração do Nó LoRaWAN Básico.

The screenshot shows a configuration interface for a Downlink packet. Under 'Scheduling', there are buttons for 'replace', 'first', and 'last'. The 'FPort' field is set to '5' and is marked as 'Confirmed'. A red arrow points from 'FPort' to the text 'Porta'. The 'Payload' section has buttons for 'bytes' and 'fields', with the value '01 03 08 0F' entered. Four red arrows point from the payload to the text labels: 'Canal de Fim', 'Canal de Inicio', 'Data Rate', and 'Período de Envio'.

Fonte: Autor.

O **Modo Scanner** é ativado configurando o pacote de downlink na porta 10, se o primeiro byte do payload for 1 o modo scanner é ativado se for 0 é desativado. A estrutura desse pacote é mostrada na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Estrutura do Pacote que Ativa o Modo Scanner do Repetidor LoRaWAN.

The screenshot shows a configuration window titled "DOWNLINK". Under "Scheduling", there are buttons for "replace", "first", and "last". The "FPort" field is set to "10" and is marked as "Confirmed" with a blue checkmark. Under "Payload", there are buttons for "bytes" and "fields", and the payload is set to "01", which is noted as "1 byte". A red arrow points from the "FPort" field to the text "Porta". Another red arrow points from the "01" payload to the text "Scanner de Pacotes".

Fonte: Autor.

Os parâmetros de configuração básicas do Repetidor LoRaWAN são configurados através de um pacote de downlink na porta 15, composto de 8 bytes, sendo que o primeiro byte é o **Data Rate (DR)**, o segundo **Canal de escuta de pacotes**, o terceiro **Porta de Repetição de Pacotes**, o quarto é o índice do endereço da lista de dispositivos que terão seus pacotes repetidos, do byte 5 até o byte 8 são os 4 bytes que compõem o endereço do dispositivo final (hexadecimal), são permitidos no máximo 5 índices que variam de 0 até 4. A estrutura desse pacote é mostrada na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Estrutura do Pacote de Configuração dos Parâmetros do Repetidor LoRaWAN.

The screenshot shows a configuration window titled "DOWNLINK". Under "Scheduling", there are buttons for "replace", "first", and "last". The "FPort" field is set to "15" and is marked as "Confirmed" with a blue checkmark. Under "Payload", there are buttons for "bytes" and "fields", and the payload is set to "03 08 64 00 26 03 11 10", which is noted as "8 bytes". Red arrows point from the payload bytes to their respective parameters: "03" to "Data Rate", "08" to "Canal de Repetição", "64" to "Porta de Repetição", "00" to "Índice da Lista", and "26 03 11 10" to "Endereço Dispositivo Final".

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos após o projeto do Nó Híbrido LoRaWAN ser finalizado e com testes prévios de laboratório já realizados. O Nó Híbrido LoRaWAN é inserido em um parque de medidores elétricos que utiliza o LoRaWAN como protocolo de rede comunicação. O parque de medidores eletrônicos está localizado no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Os resultados estão divididos em resultados que avaliam o desempenho do Nó Híbrido LoRaWAN, capacidade de repetição de pacotes, duração da bateria de *backup* e testes de estabilidade do dispositivo.

5.1 CAMPO DE PROVA

O campo de prova é localizado no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde atualmente conta com 94 medidores eletrônicos de energia elétrica com comunicação LoRaWAN e 2 gateways LoRaWAN multicanal, situados em pontos estratégicos do campus. Os medidores estão espalhados por todo o campus da Universidade Federal de Santa Maria. O mapa da localização dos medidores eletrônicos de energia elétrica e gateways são apresentados na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Mapa da localização dos medidores eletrônicos de energia elétrica (pontos azuis) e gateways (pontos amarelos) da UFSM.



Fonte: Autor.

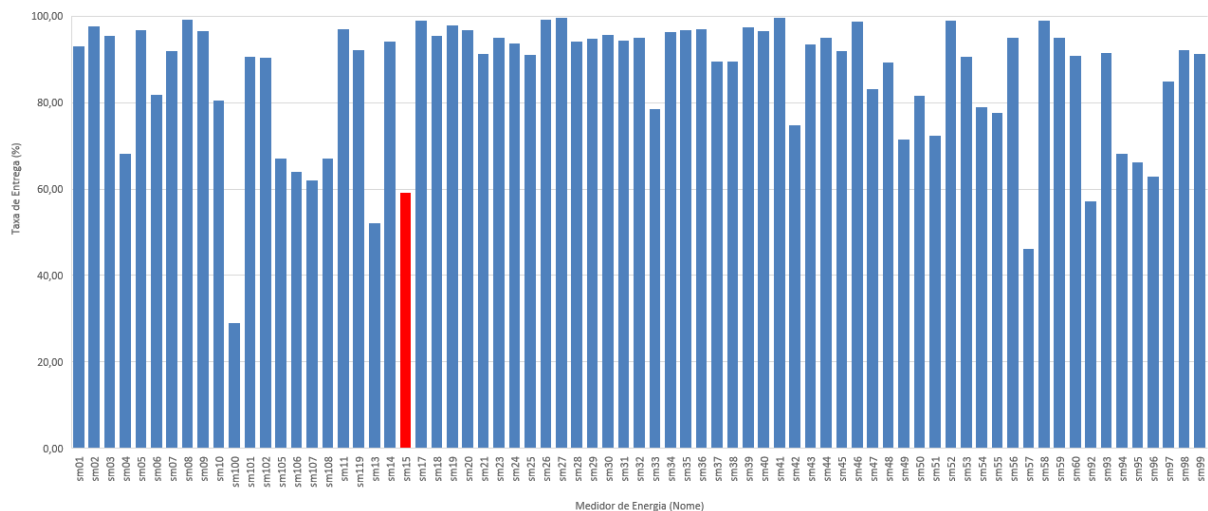
5.2 TAXA DE ENTREGA DE PACOTES LORAWAN

A taxa de entrega de pacotes representa o percentual de pacotes recebidos com sucesso em relação ao total de pacotes que foram enviados.

Para o primeiro experimento foi feito o levantamento da taxa de entrega de pacotes dos 94 medidores de energia do campus da Universidade Federal de Santa Maria, a fim de detectar medidores com baixa taxa de entrega de pacotes. Os medidores tem período de envio de 15 segundos. Isto viabiliza o teste do Nó Híbrido LoRaWAN com o modo de repetição de pacotes ativado, assim, podemos comparar a taxa de entrega de pacotes antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN, com a taxa após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.

Após o levantamento da taxa de entrega de pacotes dos medidores, detectou-se o medidor sm15 (Biotério UFSM) com taxa entrega de pacotes nas ultimas 24 horas de 59,34% o que sugere a escolha do mesmo. A escolha do sm15 se deu pela taxa de entrega ser baixa e por sua localização ser de fácil acesso para o experimento. A taxa de entrega do medidor sm15 (Biotério UFSM) destacado em vermelho é apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Taxa de entrega do medidor sm15 antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.



Fonte: Autor.

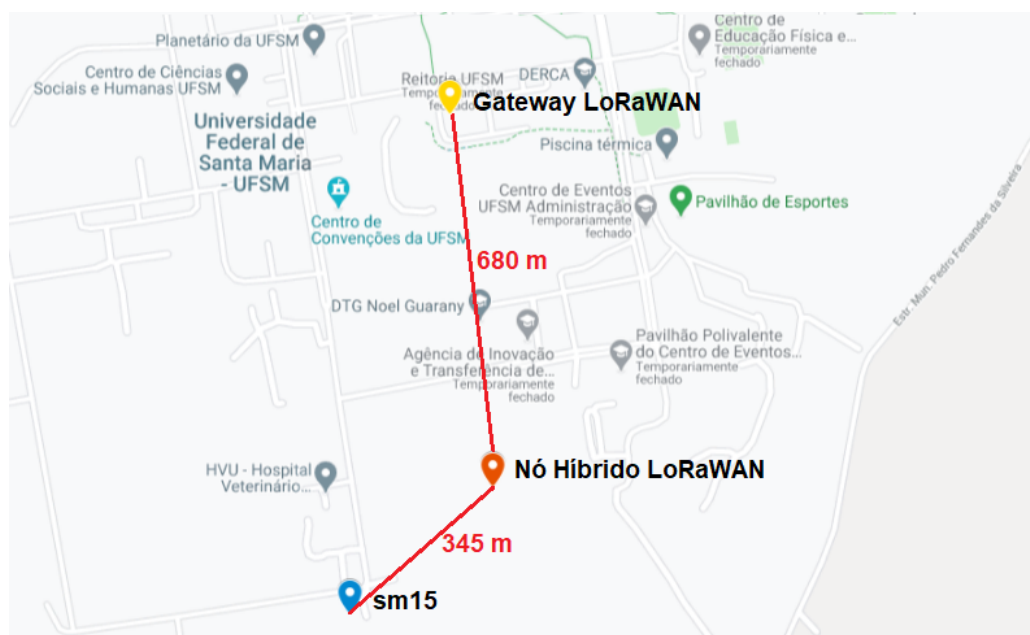
O primeiro experimento consiste em inserir o Nó Híbrido LoRaWAN entre o medidor de energia sm15 (Biotério UFSM) e o Gateway LoRaWAN (Prédio da Reitoria da UFSM). O medidor sm15 está configurado para envio de pacotes somente no canal 8 (916.8 MHz), DR 3 (SF 9 e BW 125 KHz), envios periódicos de 15 segundos e sem confirmação de recebimentos de pacotes (ACK).

A escolha do canal 8 não foi ao acaso, mas sim pela análise prévia do tráfego

de dados do gateway, que era no menor no momento, de modo a evitar interferências externas. O *DR 3* nesse caso é o mais indicado (Já que a stack LoRaWAN implementado no repetidor ainda não tem suporte ou ADR), pois propicia a maior redundância de pacotes e atende o tempo de ar ser menor que 400 ms (Seção 2.3.6).

Nesse experimento somente foi liberado para repetição de pacotes o endereço do medidor de energia sm15 (Biotério UFSM). O Nó Híbrido LoRaWAN foi alocado a uma distância de aproximadamente 680 metros do Gateway LoRaWAN que está localizado a uma altura de 30 m, a 340 metros do medidor de energia sm15. A estrutura do primeiro experimento é apresentado na Figura 5.3.

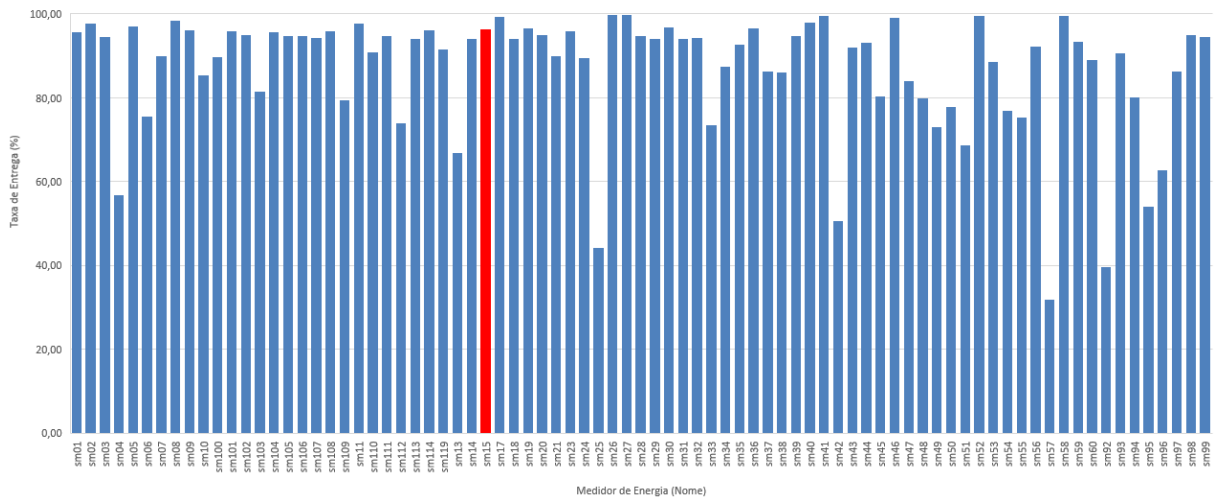
Figura 5.3 – Estrutura do primeiro experimento com o medidor de energia sm15.



Fonte: Autor.

O primeiro experimento teve um período de duração de aproximadamente 48 horas, pois foi o tempo de duração da bateria de *backup*, sendo que no local não havia fonte de energia elétrica disponível. Ao término do primeiro experimento notou-se um aumento significativo na taxa de entrega de pacotes do medidor de energia sm15. Antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN a taxa de entrega de pacotes LoRaWAN era de 59,34%, após a fim do primeiro experimento passou a ser de 96,53%, ou seja teve um aumento de 37,19% na taxa de entrega de pacotes. A taxa de entrega do medidor sm15 destacado em vermelho após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN é apresentada na Figura 5.4

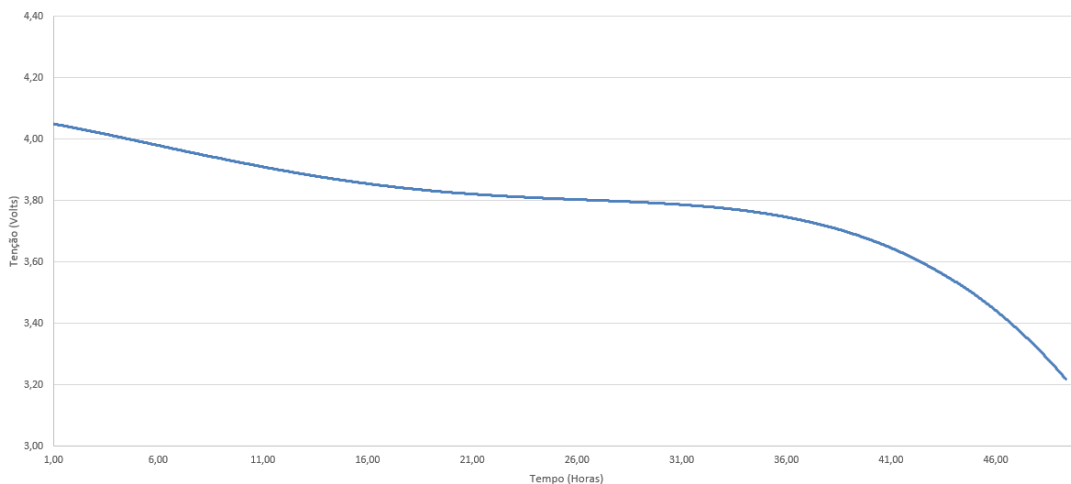
Figura 5.4 – Taxa de entrega do medidor sm15 após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.



Fonte: Autor.

No primeiro experimento também foi monitorado o consumo da bateria de *backup* ao longo do tempo, afim de traçar a curva de descarga da mesma. A curva de descarga da bateria de *backup* ao longo do primeiro experimento é apresentado na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Curva de descarga da bateria de *backup* ao longo do primeiro experimento.

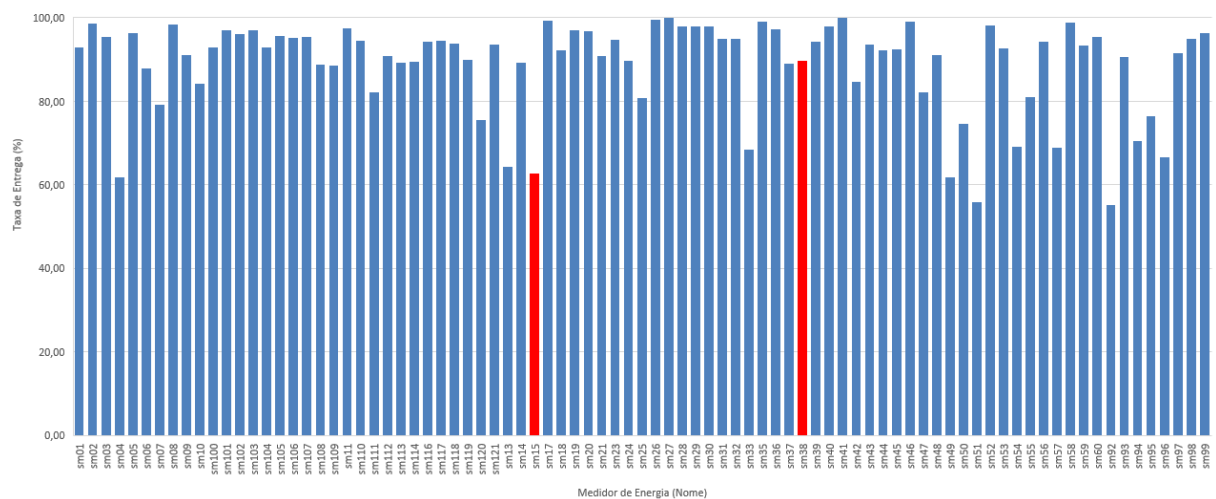


Fonte: Autor.

O segundo experimento tem características semelhantes a do primeiro experimento. O Nó Híbrido LoRaWAN continua na mesma localização, além do medidor de energia sm15 (Biotério UFSM) foi adicionado o medidor de energia sm38 (Hospital Veterinário Universitário). Os medidores estão enviando pacotes no canal 8 (916.8 MHz), *DR* 3, envios periódicos de 15 segundos e sem confirmação de recebimentos de pacotes (*ACK*). Após

a bateria de *backup* ser carregada novamente, levou-se o Nó Híbrido LoRaWAN para o campo de prova novamente. A taxa entrega de pacotes nas ultimas 24 horas dos medidores sm15 (Biotério UFSM) e sm38 (Hospital Veterinário Universitário) sem a presença do Nó Híbrido LoRaWAN, são respectivamente 62,84% e 89,69%. A escolha de adicionar o sm38 se deu pela proximidade do Nó Híbrido LoRaWAN, o que facilitou os testes. A taxa de entrega dos medidores sm15 (Biotério UFSM) e sm38 (Hospital Veterinário Universitário), sem a inserção do Nó Híbrido destacados em vermelho são apresentados na Figura 5.6.

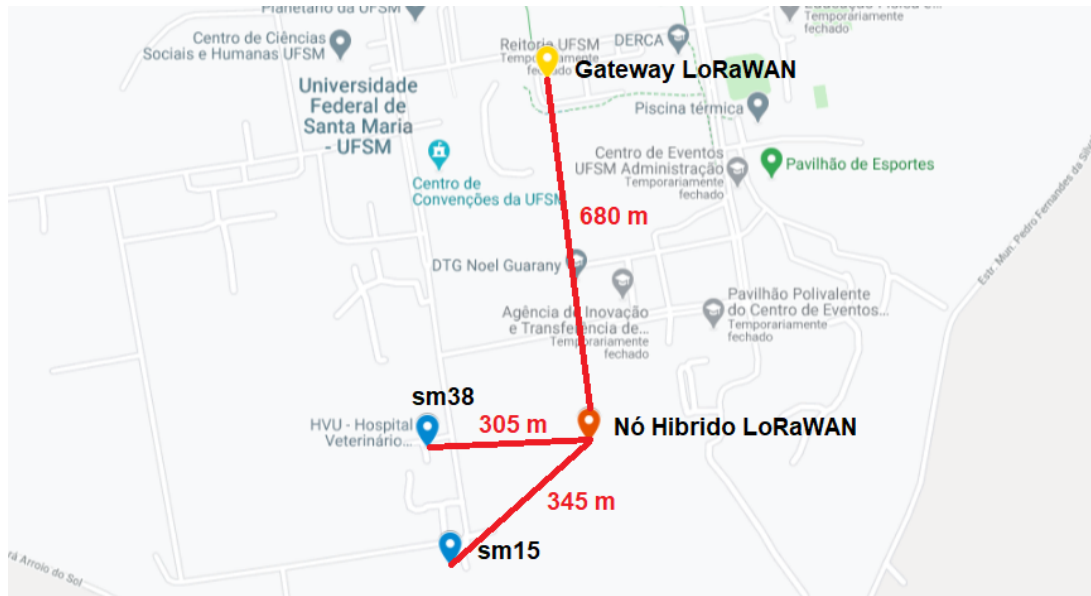
Figura 5.6 – Taxa de entrega dos medidores sm15 e sm38 antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.



Fonte: Autor.

O segundo experimento consiste em inserir o Nó Híbrido LoRaWAN próximo aos medidores de energia sm15 (Biotério UFSM) e sm38 (Hospital Veterinário Universitário). Para o experimento foi liberado para repetição de pacotes os endereços dos medidores de energia sm15 (Biotério UFSM) e sm38 (Hospital Veterinário Universitário). O Nó Híbrido LoRaWAN foi posicionado a uma distância de aproximadamente 340 metros do medidor sm15, a 305 metros do medidor sm38 e a 680 metros do Gateway LoRaWAN. A estrutura do segundo experimento é apresentado na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Estrutura do segundo experimento com os medidores de energia sm15 e sm38.

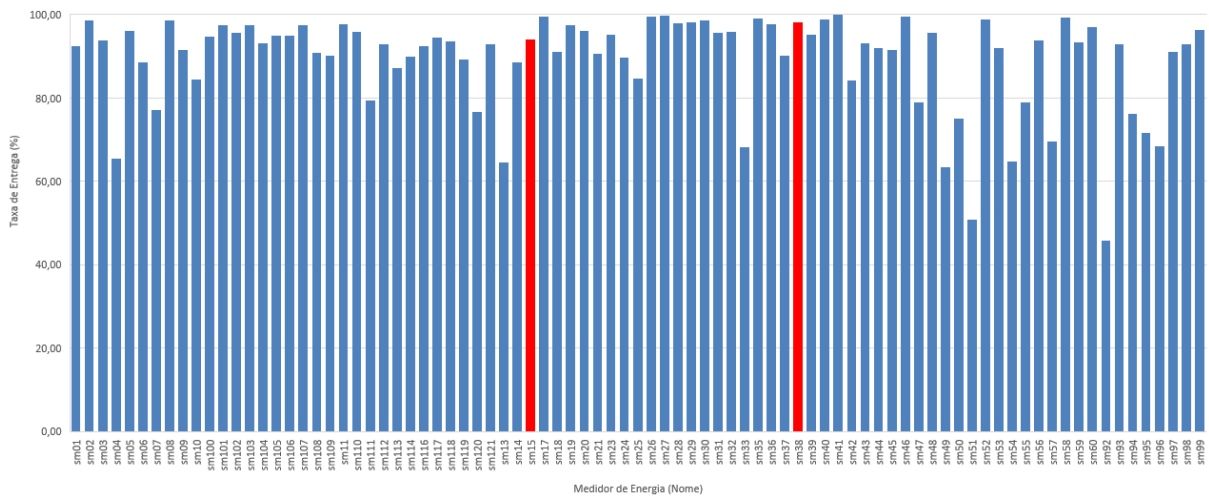


Fonte: Autor.

O segundo experimento teve um período de duração de aproximadamente 25 horas, pois foi o tempo de duração da bateria de *backup* do Nó Híbrido LoRaWAN. Ao analisar os resultados do segundo experimento também houve um aumento na taxa de entrega de pacotes do medidor de energia sm15 semelhante a do primeiro experimento, esse aumento também é percebido no medidor de energia sm38.

Antes da inserção do Nó Híbrido LoRaWAN a taxa de entrega de pacotes LoRaWAN do medidor sm15 era de 62,84%, passou a ser 94,17%, um aumento de 31,33%. A taxa de entrega de pacotes LoRaWAN do medidor sm38 que anteriormente era de 89,69%, passou a ser de 98,35%, ou seja, um aumento de 8,66%. A taxa de entrega dos medidores sm15 e sm38 após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN é apresentada na Figura 5.8 destacados em vermelho.

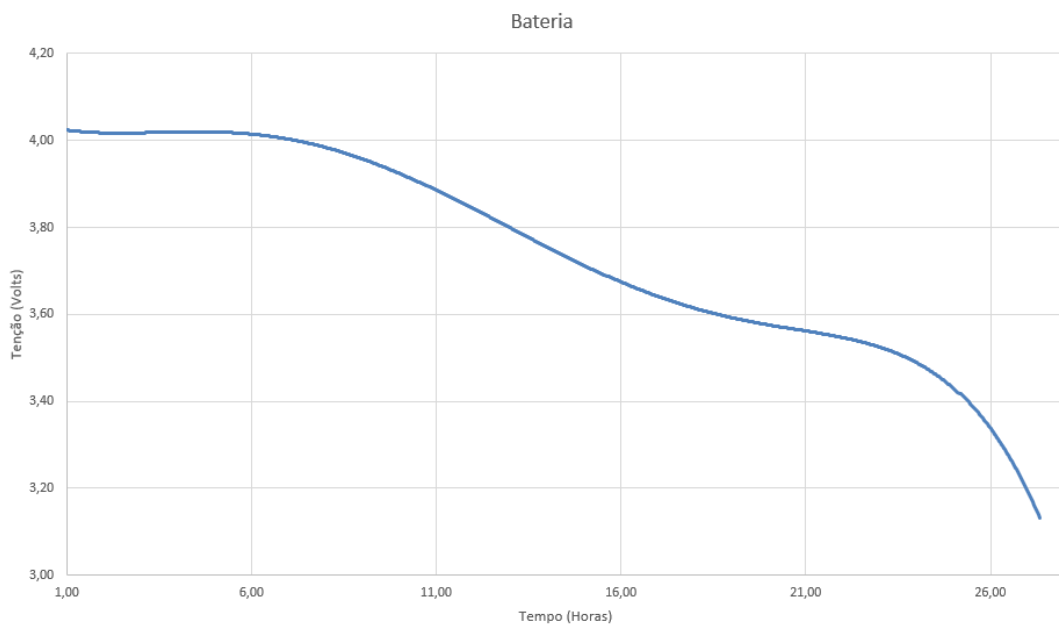
Figura 5.8 – Taxa de entrega dos medidores sm15 e sm38 após a inserção do Nó Híbrido LoRaWAN na rede.



Fonte: Autor.

No segundo experimento também foi monitorado o consumo da bateria de *backup* ao longo do experimento. A duração da bateria foi de aproximadamente de 25 horas. A curva de descarga da bateria de *backup* ao longo do segundo experimento é apresentado na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Curva de descarga da bateria de *backup* ao longo do segundo experimento.

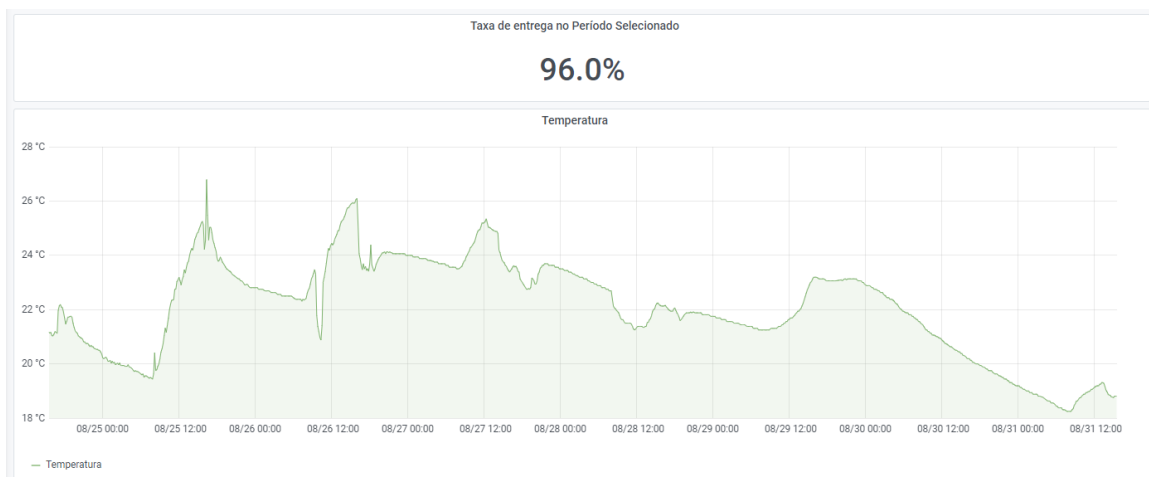


Fonte: Autor.

5.3 ESTABILIDADE DO NÓ HÍBRIDO LORAWAN

Esse experimento busca avaliar a estabilidade do funcionamento do Nó Híbrido LoRaWAN por um período de tempo maior. O Nó Híbrido LoRaWAN foi inserido em um ambiente de sala fechada por um período de 7 dias. Nesse período de testes não houve interferência humana. Esse experimento busca avaliar a estabilidade, ou seja, se o Nó Híbrido LoRaWAN apresenta algum tipo de problema como: travamento inesperado, descarga da bateria de forma inadequada, falhas constantes no envio de pacotes LoRaWAN, entre outros. O Nó Híbrido LoRaWAN foi configurado para o envio da temperatura ambiente, nível de bateria e estado da saída digital a cada 5 minutos. Também é avaliado a taxa de entrega de pacotes no período de teste, pois é um ótimo indicador de que tudo está funcionando perfeitamente. A taxa de entrega de pacotes e a temperatura enviados pelo Nó Híbrido LoRaWAN ao longo de 7 dias é apresentado na Figura 5.10.

Figura 5.10 – Gráfico de temperatura e taxa de entrega de pacotes ao longo de 7 dias.

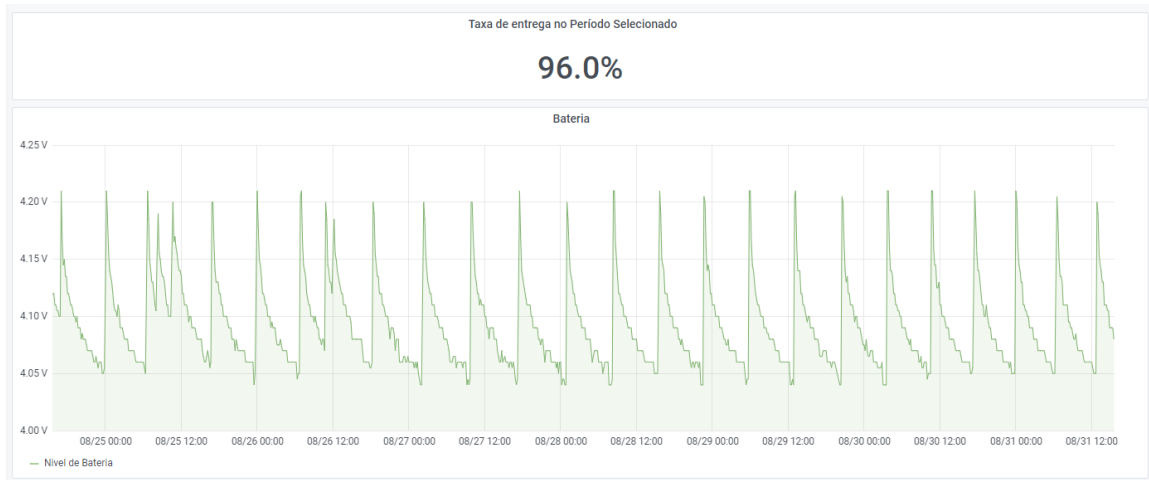


Fonte: Autor.

Ao avaliar os resultados, observamos uma taxa de entrega de 96,0%, o que é um bom resultado para aplicação não críticas. A temperatura obteve o comportamento dentro do esperado, funcionando de forma oscilante ao decorrer do dia, estando na faixa de temperatura ambiente, também não apresentou erros de leitura do sensor de temperatura (DS18B20).

No mesmo experimento foi aferido o nível de tensão da bateria, a fim de verificar seu correto funcionamento ao longo do experimento. O nível de bateria enviado pelo Nó Híbrido LoRaWAN ao longo de 7 dias é apresentado na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Gráfico de nível de bateria ao longo de 7 dias.



Fonte: Autor.

O nível de bateria ao longo do experimento, tem seu comportamento totalmente compatível com o circuito de controle de carga da bateria. Quando a bateria esta totalmente carregada, sua tensão é de 4,2V ao atingir esse nível, o carregador para de atuar, esperando a bateria descarregar até 4,05 V, assim, voltando a atuar, funcionando em ciclos.

5.4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos resultados dos experimentais observa-se que o Nó LoRaWAN Híbrido aumentou a taxa de entrega de pacotes consideravelmente. Existe alguns impactos na rede LoRaWAN ao se repetir pacotes. Se o dispositivo final LoRaWAN e o Nó LoRaWAN Híbrido estiverem ao alcance do Gateway LoRaWAN, o Nó LoRaWAN Híbrido pode ser considerado como um novo dispositivo na rede podendo causar aumento do tráfego.

O Nó LoRaWAN Híbrido tem capacidade de repetição de no máximo 5 dispositivos finais (definidos no firmware embarcado), justamente por só conseguir repetir pacotes em um único canal esse numero foi limitado, se o período de envio do dispositivo final for na ordem de segundos, pode haver falhas ao repetir esses pacotes, devido ao processo de repetição interno do próprio Nó LoRaWAN Híbrido e processos ligados a pilha LoRaWAN.

O Nó LoRaWAN Híbrido é para ser usado com dispositivos finais que tenham nível baixo de sinal e não é indicado para dispositivos finais que estão sofrendo interferência por colisões de pacotes. Pode ser usado neste caso, mas outras soluções podem ser mais adequadas para isso.

De modo geral o Nó LoRaWAN Híbrido, se comportou de forma adequada, enviando seus próprios pacotes e repetindo os pacotes dos medidores selecionados, por

consequência aumentando a taxa de entrega dos medidores. Observa-se que a bateria de *backup* tem sua duração prejudicada ao se adicionar mais de um medidor, ou seja, a duração da bateria está diretamente ligada ao número de dispositivos que tem seus pacotes repetidos e ao período que esses são enviados.

Por fim esse trabalho vem instigar, mais pesquisas relacionadas a repetição de pacotes no protocolo LoRaWAN, assim, podendo ser um alternativa de baixo custo, que vem para melhor a confiabilidade da rede LoRaWAN, ou até mesmo para a extensão da mesma.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto o projeto e desenvolvimento de um Nó Híbrido LoRaWAN, que contempla Nó LoRaWAN Básico e Repetidor de Pacotes LoRaWAN no mesmo dispositivo. Foi abordado tanto o desenvolvimento de hardware quanto de software embarcado do início até o produto final.

O Nó Híbrido LoRaWAN é inserido na rede LoRaWAN de forma transparente, sem a necessidade de alteração ou reconfiguração dos dispositivos finais. Mostra-se que quando o Nó Híbrido LoRaWAN é inserido na rede, a taxa de entrega de pacotes é melhorada significativamente. Também há possibilidade de utilizar o Nó Híbrido LoRaWAN para a extensão da cobertura da rede, ou melhoria do sinal em locais com pouca cobertura, sem a necessidade de adicionar um novo gateway na rede LoRaWAN.

Por fim, foram apresentados os resultados dos experimentos realizados com o Nó Híbrido LoRaWAN. Os resultados obtidos demonstram uma boa alternativa de baixo custo A.1 para a melhoria da confiabilidade da rede LoRaWAN ou até mesmo para casos pontuais que necessitem de melhoria na taxa de entrega de pacotes LoRaWAN.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O projeto proposto e desenvolvido na dissertação, é passível de algumas melhorias e testes em trabalhos futuros, essas são sugeridas a seguir:

- Implementação da classe C na pilha LoRaWAN;
- Análise da viabilidade de atualizar o projeto para multi-canal de repetição e envio de pacotes LoRaWAN;
- Aplicação do projeto em algum tipo de inteligência, já que o Nó Híbrido LoRaWAN permite ser configurado pela própria rede, ou seja a inteligência pode estar no servidor de rede ou em uma aplicação externa;
- Análise da viabilidade de atualizar o projeto para detecção e repetição de pacotes com multi *DR*;
- Estudo de impacto de se utilizar um repetidor de pacotes na rede LoRaWAN;
- Simulação do impacto de se utilizar múltiplos repetidores de pacotes na rede LoRaWAN.

6.2 PUBLICAÇÕES REALIZADAS AO DECORRER DO MESTRADO

Ao decorrer do mestrado, foram publicados os seguintes trabalhos:

MAZIERO, L., MARCHEZAN, T. B., BARRIQUELLO, C. H., BERNARDON, D. P., CARLOTO, F. G., RECK, F. G., VIZZOTTO, W. D., GARCIA, F. V., **"Monitoring of Electric Parameters in the Federal University of Santa Maria Using LoRaWAN Technology"**, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895425.

MAZIERO, L., MARCHEZAN, T. B., BARRIQUELLO, C. H., CARLOTO, F. G., RECK, F. G., VIZZOTTO, W. D., **"Projeto de um Repetidor LoRaWAN de Baixo Custo e Baixo Consumo de Energia"** 2019 Seminar On Power Electronics And Control (SEPOC 2018), Santa Maria, Brazil, 2018, pp. 1-4.

CARLOTO, F. G., DALLA COSTA M. A., BARRIQUELLO, C. H., BERNARDON D. P., SPODE, N. S., MAZIERO, L., VIZZOTTO, W. D., RECK, F. G., **"The Role of a Smart Street Lighting into a Smart Grid Environment"**, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895267.

RECK, F. G., SPERANDIO, M., BARRIQUELLO, C. H., CARLOTO, F. G., MAZIERO, L., VIZZOTTO, W. D., **"Fault Indication in Distribution Systems Using an LPWAN Network"**, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895460.

VIZZOTTO, W. D., CARLOTO, F. G., MAZIERO, L., RECK, F. G., GARCIA, F. V., BARRIQUELLO, C. H., BERNARDON, D. P., MARCHEZAN, T. B., **"Advanced Metering Infrastructure Case Study in Federal University of Santa Maria"**, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895018.

6.2.1 Registro de Softwares

BERNARDON, D. P., BARRIQUELLO, C. H., MAZIERO, L., CARLOTO, F. G., DALLA COSTA M. A. **Sistema de Gerenciamento Inteligente para Iluminação Pública**. Titulares: RGE SUL DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A.; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA UFSM; MONT SOLUCOES EM ENGENHARIA LTDA - ME. BR512020001412-7. Data de

publicação: 20/05/2020. Data de criação: 20/05/2020.

BERNARDON, D. P., MARCHEZAN, T. B., BARRIQUELLO, C. H., MAZIERO, L., CARLOTO, F. G. **Painel de Monitoramento de Grandezas Elétricas do Campus UFSM**. Titulares: RGE SUL DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A.; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA UFSM; MONT SOLUCOES EM ENGENHARIA LTDA - ME. BR512020001412-7. Data de publicação: 20/05/2020. Data de criação: 20/05/2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANATEL. **ANATEL: Lorawan for developers**. 2017. Acessado em 04 dez 2019. Disponível em: <https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=2549681&id_orgao_publicacao=0>.

Atmel/Microchip. **ATmega328P**: Atmega328p. 2020. 260 p. Acessado em 02 Ago 2020. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>.

CHOI, R.; LEE, S.; LEE, S. Reliability improvement of lora with arq and relay node. **Symmetry**, MDPI AG, v. 12, n. 4, p. 552, Apr 2020. ISSN 2073-8994. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/sym12040552>>.

Julio, Branquinho. **LoRa**: Lora. 2018. Acessado em 02 out 2019. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/lora>>.

JUNIOR, V. P. da S. Conheça a tecnologia lora e o protocolo lorawan. 2019. Acessado em 03 dez 2019. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan>>.

KIM, D.-H.; LEE, E.-K.; KIM, J. Experiencing lora network establishment on a smart energy campus testbed. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 7, p. 1917, 2019.

Kirichek, R. et al. Analytic model of a mesh topology based on lora technology. In: **2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 251–255.

LoRa, Alliance. **LoRa Alliance**: about-lora-alliance. 2019. Acessado em 01 out 2019. Disponível em: <<https://lora-alliance.org>>.

LoRa Alliance. **LoRaWAN Regional Parameters**: Lorawan for developers. 2019. Acessado em 01 dez 2019. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf>.

Lundell, D. et al. A routing protocol for lora mesh networks. In: **2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 14–19.

OLIVEIRA, G. C. de. Localização indoor utilizando a tecnologia lorawan e aprendizado de máquina. 2017.

Peter R. Egli. **OVERVIEW OF EMERGING TECHNOLOGIES FOR LOW POWER WIDE AREA NETWORKS IN INTERNET OF THINGS AND M2M SCENARIOS**: Lpwan. 2015. Acessado em 05 out 2019. Disponível em: <http://www.indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf>.

RABUSKE, M. H. B. **ESTUDO DO PROTOCOLO LORAWAN E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE PRIVADA COM NÓS DISTRIBUÍDOS**. 2017. 27, 28, 29 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

Ray, Brian. **What Is LoRa? A Technical Breakdown**: what-is-lora. 2017. Acessado em 01 out 2019. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>>.

Sakshama, Ghosly. **All About LoRa and LoRaWAN**: Home page. 2017. Acessado em 01 out 2019. Disponível em: <<https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>.

Sartori, B. et al. Enabling rpl multihop communications based on lora. p. 1–8, Oct 2017.

Semtech. **Semtech**: Home page. 2019. Acessado em 02 out 2019. Disponível em: <<https://www.semtech.com>>.

_____. **SX1276-7-8-9 Datasheet**: lora-transceivers. 2019. Acessado em 20 out 2019. Disponível em: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OKs/Bs97dmPXeatnbdoJNVMI DaKDIQz8q1N_gxDcgqi7g2o>.

Sisinni, E. et al. Enhanced flexible lorawan node for industrial iot. p. 1–4, June 2018.

SOUZA, P. M. D. **ANÁLISE SOBRE AS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS EM REDES LPWAN**. 2018. 23 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Estadual de Londrina, LONDRINA, 2018.

STANIEC, K.; KOWAL, M. Lora performance under variable interference and heavy-multipath conditions. **Wireless communications and mobile computing**, Hindawi, v. 2018, 2018.

Terada, K.; Mukai, H.; Yokotani, T. Enhancement of mac protocol for power reduction in lora wan. In: **2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 324–326.

ANEXO A – LEVANTAMENTO DE PREÇOS DO NÓ HÍBRIDO LORAWAN

O preço dos itens utilizados no projeto, juntamente com o valor total é mostrado no Quadro A.1.

Quadro A.1 – Levantamento de Preços do Nó Híbrido LoRaWAN.

Itens	Descrição	Preço
Antena	Antena 915,0 MHz	R\$ 52,00
Cabo Pigtail	Cabo Pigtail Mini SMA (F) 15 Cm	R\$ 19,90
Módulo LoRa	RFM95	R\$ 49,50
Microcontrolador AVR	ATmega328P	R\$ 11,90
Cristal	Cristal 8 MHz	R\$ 1,20
Botão	Push Button SMD	R\$ 0,25
Conversor Boost	TPS6132	R\$ 4,45
Saída Digital	SIP3251	R\$ 0,85
Sensor de Temperatura	DS18B20	R\$ 12,40
Resistores	Diversos valores	R\$ 5,00
Placa PCI	Placa PCI de Fibra de Vidro	R\$ 10,00
Caixa Plástica	Caixa Patola PB-075 35x60x75mm	R\$ 5,30
–	–	–
Total	–	R\$ 172,75

Fonte: Autor.