

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO

ELIEL DE ALBUQUERQUE

MULTI-LORA - REDE DE COMUNICAÇÃO COM LORA  
MULTI-RÁDIO E MULTI-HOP PARA IOT EM LARGA ESCALA

SÃO LEOPOLDO  
2021



Eliei de Albuquerque

MULTI-LORA - REDE DE COMUNICAÇÃO COM LORA  
MULTI-RÁDIO E MULTI-HOP PARA IOT EM LARGA ESCALA

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em Computação  
Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos  
Sinos — UNISINOS

Orientador:  
Prof. Dr. Cristiano Bonato Both

São Leopoldo  
2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Albuquerque, Eliel de

Multi-LoRa - Rede de Comunicação com LoRa multi-rádio e multi-hop para IoT em larga escala / Eliel de Albuquerque — 2021.

60 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, 2021.

“Orientador: Prof. Dr. Cristiano Bonato Both, Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação”.

1. LoRa. 2. Multi-rádio. 3. Multi-hop. 4. IoT. I. Título.

CDU 004.73

Bibliotecária responsável Vanessa Borges Nunes — CRB 10/1556

## **AGRADECIMENTOS**

As páginas resultantes desse trabalho são frutos de um esforço conjunto e colaborativo para os quais agradeço imensamente a participação daqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o seu desenvolvimento.

Primeiramente agradeço a Deus sobre todas as coisas, também, a minha esposa e filha que apoiou e compreendeu a ausência durante essa jornada.

Ao meu orientador, professor Cristiano Bonato Both, por toda a dedicação, paciência e condução do processo durante a realização deste trabalho.

Ao professor Lúcio Prade por sua contribuição, sem dúvida essencial, para a concretização de toda a pesquisa envolvendo o tema.



## RESUMO

Os dispositivos de IoT (*Internet of Things*) devem cobrir grandes áreas de terras agricultáveis para coletar informações vitais, evitando perdas financeiras para melhorar a eficiência na agricultura. É fundamental realizar coleta de dados em fazendas onde a conectividade de rede é uma limitação. Rede LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), de longa distância, fornece uma ampla área de cobertura para aplicativos IoT, usando bandas de frequência não licenciadas com baixo consumo de energia e taxa de transferência. No entanto, LoRaWAN não é adequada para aquisição de dados em fazendas com milhares hectares e cobertura igual ou superior as dimensões apresentadas na literatura em regiões com declive ou aclive de solo. A tecnologia LoRa (*Long-Range*) surge como uma solução promissora em aplicações que exige implantação com extensões iguais ou maiores a área recomendada. No entanto, uma arquitetura *multi-rádio* e *multi-hop* deve ser projetada para lidar com as limitações da implantação da tecnologia LoRa em cenários de grande escala, como sua natureza *half-duplex*. Este trabalho apresenta uma arquitetura de comunicação LoRa multi-rádio e *multi-hop* para aprimorar a cobertura e o serviço para implantação de IoT em larga escala em áreas rurais chamado Multi-LoRa. Além disso, um protótipo de hardware é apresentado para implementar fisicamente a arquitetura Multi-LoRa. Os resultados mostram que Multi-LoRa efetivamente mitiga as dificuldades de comunicação *multi-hop* sobre LoRa para implantação de IoT em larga escala. Multi-LoRa reduziu o atraso em 60% e perda de pacotes em 2.9% em comparação com diferentes configurações de Multi-LoRa em um ambiente de teste físico em pequena escala e ambiente de emulação em grande escala.

**Palavras-chave:** LoRa. Multi-rádio. Multi-hop. IoT.





## ABSTRACT

IoT (Internet of Things) devices must cover large areas of arable land to collect vital information, avoiding financial losses to improve efficiency in agriculture. It is critical to perform data collection on farms where network connectivity is a limitation. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) provides a wide coverage area for IoT applications using unlicensed frequency bands with low power consumption and low throughput. However, LoRaWAN is not suitable for data acquisition on farms with thousands of hectares and coverage equal to or greater than dimensions presented in the literature in regions with slope or slope of soil, a multi-hop LoRa (Long-Range) network has emerged as a promising solution in applications that require deployment with extensions equal to or greater than the area recommended. However, a multi-hop architecture must be designed to deal with the limitations of deploying LoRa in large-scale scenarios such as its half-duplex nature. This work presents a multi-radio and multi-hop LoRa communication architecture to improve the coverage and service for large-scale IoT deployment in rural areas called Multi-LoRa. Furthermore, we present a hardware prototype to physically implement the Multi-LoRa architecture. The results show that Multi-LoRa effectively mitigates the difficulties of multi-hop communication over LoRa for large-scale IoT deployment. Multi-LoRa reduced delay by 60% and packet loss by 2.9% compared to different Multi-LoRa configurations in a small-scale physical test environment and large-scale emulation environment.

**Keywords:** LoRa. Multi-radio. Multi-hop. IoT.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Arquitetura LoRaWAN . . . . .	23
Figura 2:	Problema clássico do terminal exposto em redes de malha . . . . .	27
Figura 3:	Problema clássico do terminal escondido em redes em malha . . . . .	27
Figura 4:	Visão geral do cenário de larga escala . . . . .	36
Figura 5:	Visão geral da arquitetura de rede . . . . .	37
Figura 6:	Visão geral do protótipo . . . . .	41
Figura 7:	Formato de pacote . . . . .	42
Figura 8:	Diagrama de sequência para a fase de descoberta . . . . .	44
Figura 9:	Diagrama de sequência para a fase de aprendizagem . . . . .	45
Figura 10:	Diagrama de sequência para a fase de encaminhamento . . . . .	46
Figura 11:	APD por diferente tamanho de pacote . . . . .	52
Figura 12:	Perda por diferente tamanho de pacote . . . . .	52
Figura 13:	APD por diferente número de nó . . . . .	53
Figura 14:	Perda por diferente número de nó . . . . .	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Valores teóricos de taxa de transmissão em função do SF . . . . .	26
Tabela 2:	Estudos analisados sobre multi-hop e multi-rádio em cenários de grande escala	32
Tabela 3:	Orçamento para um nó Multi-LoRa . . . . .	47
Tabela 4:	Parâmetros de avaliação para a arquitetura Multi-LoRa . . . . .	50



## LISTA DE SIGLAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CSS	<i>Compressed High Intensity Radar Pulse</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Protocol Distance Vector</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HWMP	<i>Hybrid Wireless Mesh Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
IOT	<i>Internet Of Things</i>
LPWAN	<i>Low-power wide-area network</i>
LoRa	<i>Long Rang</i>
LoRaWAN	<i>Long-Range Wide Area Network</i>
MAC	<i>MAC Address</i>
M2M	<i>Machine to machine</i>
NB-IoT	<i>NarrowBand-IoT</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PLR	<i>Packet Loss Ratio</i>
RX	<i>Receive</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
TTL	<i>Time to Live</i>
TX	<i>Transmission</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Network</i>





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação	18
1.2	Projeto de estudo de pesquisa	18
1.3	Organização do texto	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	Rede de comunicação LPWAN	21
2.2	Rede LoRa	22
2.3	Rede Mesh	25
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>29</b>
3.1	Metodologia da revisão sistêmica da literatura	29
3.2	Descrição dos principais trabalhos	29
3.3	Categorização dos artigos selecionados	32
<b>4</b>	<b>REDE MULTI-LORA</b>	<b>35</b>
4.1	Decisões de projeto	35
4.2	Arquitetura de rede Multi-LoRa	36
<b>5</b>	<b>PROTÓTIPO MULTI-LORA</b>	<b>41</b>
5.1	Implementação do protótipo	43
5.2	Estimativa de custo do protótipo	46
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO PARA AVALIAÇÃO</b>	<b>49</b>
6.1	Métricas de avaliação	49
6.2	Cenários de testes	50
6.3	Análise em pequena escala	51
6.4	Análise em larga escala	53
6.5	Análise dos resultados	54
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A recente explosão da tecnologia IoT (*Internet of Things*) está mudando drasticamente a sociedade por meio de tecnologias disruptivas em novos conjuntos de verticais e aplicativos. Fazendas inteligentes e distribuição de energia elétrica rural monitorados por rede inteligente são apenas alguns exemplos de ambientes inteligentes verticais de IoT (KULATUNGA et al., 2017; VISCONTI et al., 2020). As LPWAN (*Low-power wide-area network*) são um novo grupo de tecnologias que têm complementado as tecnologias celulares, baseadas na utilização de bandas ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) e transmissores de rádio de baixa potência para criar soluções com baixo custo de hardware e cobertura ubíqua. Além disso, LPWAN é um padrão que opera nas bandas não licenciadas ISM próximas a 868 MHz e 900 MHz nas diversas regiões do globo. As tecnologias discutidas neste trabalho desempenham um papel importante na conexão de dispositivos no campo, pois contemplam requisitos que atendem às aplicações de agricultura digital permitindo uma maior cobertura e baixo consumo de energia em troca de taxas de transmissão reduzidas (PASOLINI et al., 2018).

Na literatura especializada é possível observar diversos estudos aplicando soluções LPWAN, como proposta para solucionar os desafios de redes de larga escala em regiões rurais para IoT, dentre elas, destaca-se o emprego da tecnologia LoRaWAN (*Long-Range Wide Area Network*). A arquitetura LoRaWAN atua sobre uma comunicação de salto único entre o dispositivo IoT e o gateway em vários canais, formando uma topologia de rede em estrela. Dessa forma, a arquitetura LoRaWAN fornece conectividade para dispositivos IoT implantados em uma vasta área, empregando um mecanismo de controle de acesso com menor complexidade ao custo de baixo rendimento (QADIR et al., 2018). Especificamente, LoRaWAN atinge uma faixa de cobertura de 5 km em áreas urbanas e cerca de 15 km em áreas rurais (Gambiroza et al., 2019). Portanto, as propriedades de baixo consumo de energia, baixo custo e longo alcance fornecidas pelo LoRaWAN permitem que os dispositivos se espalhem e se movam por grandes áreas geográficas (DANTAS et al., 2021).

Ainda que LoRaWAN forneça ampla cobertura em áreas rurais com um gateway, essa tecnologia pode não ser suficiente para receber dados em fazendas com milhares de hectares (VISCONTI et al., 2020). A implantação de múltiplos gateways podem ser integrada aos ecossistemas de rede para aumentar a área de cobertura. No entanto, esta opção pode gerar investimento de capital (*CAPital EXpenditure* - CAPEX) e despesas operacionais (*Operational Expenditure* - OPEX), incluindo o custo de um gateway, locação, manutenção, etc. Neste contexto, novas pesquisas de longo alcance atraem a atenção da academia e da indústria para capturar os requisitos de comunicação de longo alcance, por meio de recursos promissores em uma ampla área de bandas de frequência não licenciadas com baixo consumo de energia e baixo rendimento (QADIR et al., 2018).

## 1.1 Motivação

Mesmo que LoRaWAN forneça ampla cobertura em áreas rurais com um gateway, essa tecnologia não é suficiente para aquisição de dados em fazendas com tamanho de milhares de hectares. A implantação de múltiplos gateways podem ser integrada aos ecossistemas de rede para aumentar a área de cobertura. Portanto, uma rede multi-rádio e *multi-hop* desempenha um papel essencial para aplicações que requerem implantação extensiva, o que não é abordado pela arquitetura LoRaWAN (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020; DANTAS et al., 2021). Especificamente, é possível considerar a comunicação multi-rádio e *multi-hop* entre os gateways, dispositivos IoT ou ambos para aumentar a área de cobertura (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020). Dessa forma, não é conveniente ou viável implantar vários gateways em cenário rural, principalmente devido aos custos. Entretanto, os dispositivos IoT podem monitorar o ambiente e funcionar como um retransmissor com custo reduzido para fornecer conectividade para qualquer dispositivo IoT implantado em grandes áreas rurais (KULATUNGA et al., 2017). Neste contexto, faz-se necessário projetar uma arquitetura *multi-rádio* e *multi-hop*, considerando apenas o rádio LoRa.

Vários rádios atenuam a colisão causada pela natureza do rádio LoRa *half-duplex*, vários rádios diminuem o uso do canal para enviar um pacote, o que reduz a taxa de colisão. No entanto, as camadas superiores MAC (*Media Access Control*) e de roteamento podem considerar um esquema de transmissão eficiente em vários rádios para minimizar o problema da atenuação (GHASEMPOUR, 2019). Por exemplo, a camada MAC deve gerenciar com eficiência a camada de controle de acesso ao meio de vários rádios. Em contraste, a camada de roteamento deve atender às características dessa arquitetura multi-rádio e *multi-hop*, com menor sobrecarga de sinalização e uso de comunicação *half-duplex*. Além disso, as camadas superiores devem considerar os principais requisitos do aplicativo individualmente, em vez de uma solução única para melhor atender aos recursos limitados de tal arquitetura multi-rádio e *multi-hop*. Portanto, é fundamental projetar uma arquitetura multi-rádio e *multi-hop* eficiente para transmitir dados de dispositivos IoT implantados em cenários rurais para IoT em grande escala. No entanto, o estado da arte não apresenta uma arquitetura que integre a comunicação LoRa multi-rádio e *multi-hop* em uma solução eficiente, de acordo com nosso melhor conhecimento. Dessa forma, esse trabalho refere-se a uma pesquisa ímpar frente a literatura, como apresentado no capítulo de trabalhos relacionados.

## 1.2 Projeto de estudo de pesquisa

Com base nesse desafio, este trabalho implementa uma arquitetura de comunicação LoRa multi-rádio e *multi-hop* para aumentar a cobertura e o serviço de implantação de IoT em larga escala em áreas denominada rurais. A arquitetura fornece uma referência para a implementação de redes de comunicação baseadas na camada física LoRa. Além disso, a arquitetura considera

uma topologia de rede ad hoc para aumentar a área de cobertura. Neste contexto, mecanismos de multiplexação de dados em vários rádios LoRa foram projetados para aumentar o rendimento e reduzir as colisões. Desta forma, a arquitetura prioriza tipos de dados específicos, diminuindo o *jitter* entre os saltos da rede. Finalmente, um estudo de caso experimental é apresentado para análise do desempenho da arquitetura proposta. As principais contribuições são resumidas a seguir:

1. Uma arquitetura que permite a comunicação LoRa multi-rádio e *multi-hop* entre dispositivos IoT para aplicativos com requisitos de serviço de monitoramento.
2. Um protótipo de hardware para implementação física da arquitetura que consiste na implementação de hardware e software.
3. Experimentos em cenários físicos e emulado para avaliar os impactos e benefícios da arquitetura proposta.

Este trabalho estende o trabalho “Arquitetura de malha LoRa para automação de redes de distribuição de eletricidade rural” apresentado por Prade (PRADE et al., 2020). Como contribuição, esse trabalho inclui uma ampla revisão do estado da arte, uma descrição mais detalhada da arquitetura da arquitetura Multi-LoRa adaptada a agricultura inteligente e uma avaliação abrangente de desempenho da arquitetura Multi-LoRa em áreas rurais para aumentar a conectividade para IoT.

### 1.3 Organização do texto

Este trabalho está organizado em 7 capítulos. Inicialmente, o capítulo 2 apresenta conceitos fundamentais para a compreensão do restante do trabalho. Em seguida, o capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados aos temas dessa pesquisa. Esse capítulo visa apresentar o que já existe no estado da arte, bem como identificar a existência lacunas e oportunidades da literatura. o capítulo 4 apresenta o modelo proposto nesse trabalho, que visa preencher as lacunas identificadas no capítulo anterior, bem como atingir os objetivos do presente trabalho. O capítulo 5 apresenta o protótipo de hardware e software desenvolvido e implementado, também, estimativas de custos de aquisição. No capítulo 6 é abordada a metodologia de avaliação de desempenho bem como parâmetros usados no ambiente e resultados obtidos. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões que puderam ser obtidas e apontamentos para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais fundamentos para a composição desta dissertação. Inicialmente, os conceitos referentes a redes LPWAN são apresentados, seguidos dos fundamentos de rede LoRa, discutindo suas camadas física e rede.

### 2.1 Rede de comunicação LPWAN

Ao passar dos anos foram desenvolvidas diversas tecnologias de comunicação sem fio para IoT conhecidas como LPWAN, segundo (RAZA et al., 2017). As redes LPWAN tem como características, transmissão de longo alcance, baixo consumo energético e baixa taxa de dados, tornando as redes LPWAN atrativas para aplicações IoT, que consomem poucos dezenas de bytes de dados a cada poucos minutos, como monitoramento de poluição do ar, monitoramento de tráfegos nas *smart grids* e estações meteorológicas de campo na agricultura (BELLO; ZEDADALLY, 2019). Esses exemplos são alternativas utilizadas para comunicação entre usuários e objetos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação para IoT. Redes LPWAN utilizam topologia estrela, onde vários sensores enviam dados diretamente a um concentrador, normalmente nomeado de gateway, que possui conexão com a Internet (MEKKI et al., 2019).

Apesar do tema parecer recente, na década de 1980 surgiram redes que faziam o uso semelhante desta topologia e arquitetura conhecida hoje como LPWAN, na época, usada para conectar dispositivos de alarme. Com a crescente demanda de conectividade entre os dispositivos, dado as aplicações IoT e M2M (*Machine to machine*), diversas empresas uniram esforços para desenvolver tecnologias para atender essa necessidade (HAXHIBEQIRI et al., 2018). Em meados de 2009, inicia-se um novo capítulo na história das LPWANs, com a empresa francesa SIGFOX<sup>1</sup> pioneira da nova era das LPWANs e, desde então, diversos colaboradores e empresas desenvolvem soluções e dispositivos para LPWANs.

LPWANs implementam uma tecnologia de camada física que prioriza a taxa de transmissão por alcance, pois quanto menor a taxa de transmissão maior a duração da mensagem resultando no aumento de qualidade de recepção do sinal e proporcionando uma maior cobertura, estimada na ordem de 5 km em áreas urbanas e 15 km em áreas rurais. Apesar da baixa taxa de transmissão, na ordem de centenas de bits ou dezenas que kilobits, as LPWANs atendem as muitas aplicações IoT, que normalmente, demandam transmissões sazonais de dados (SANCHEZ-IBORRA et al., 2018). Todavia, os dispositivos LPWAN rompem paradigmas utilizando técnicas de modulação, que permitem transmitir a longas distâncias, resguardando ainda ao máximo de consumo de energia. Dentre as principais opções de LPWANs disponíveis, algumas ganham destaque, tais como, LoRa, operando em frequência de radio não licenciada, conseqüentemente mais acessíveis.

---

<sup>1</sup><https://www.sigfox.com/en>

## 2.2 Rede LoRa

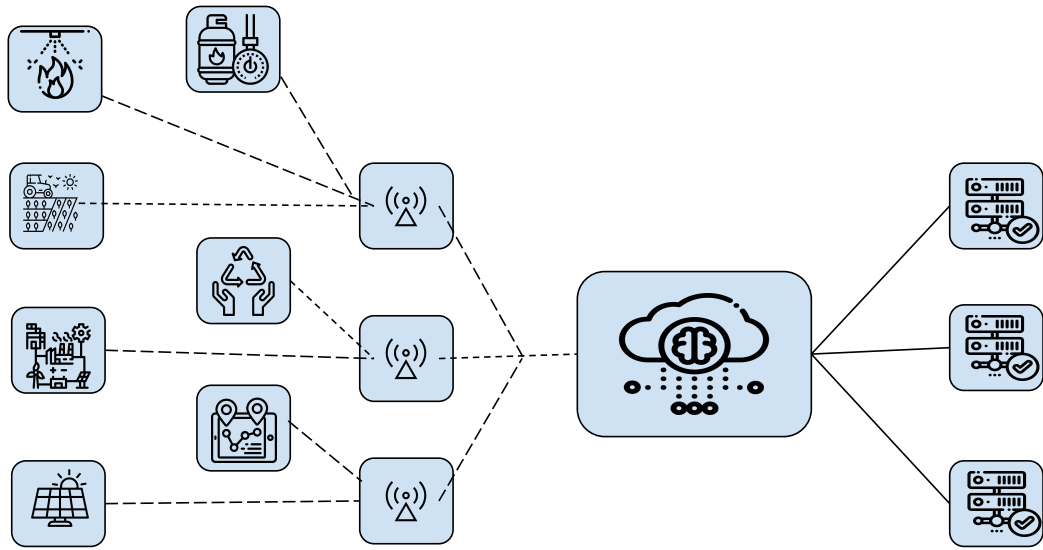
LoRa define a tecnologia de camada física desenvolvida e patenteada pela empresa americana Semtech Corporation, 2015. Essa camada é responsável pela modulação do sinal utilizando uma técnica de espalhamento espectral. Além disso, essa técnica tem como característica espalhar o sinal sobre uma larga faixa de frequência, denominada de *Chirp Spread Spectrum* (CSS) - espalhamento espectral Chirp (BABAEI; SHARIFIAN, 2018). A informação é codificada utilizando os Chirp (*Compressed High Intensity Radar Pulse*, em português, Pulso de Radar de Alta Intensidade Comprimido) de frequência com uma variação linear da frequência do tempo (não há variação de fase entre símbolos adjacentes). Com a fixação da linearidade, *offsets* de frequência entre o transmissor e o receptor podem ser facilmente eliminados na decodificação. Essa característica ajuda no baixo custo do dispositivo, pois os cristais utilizados no transmissor não precisam ser fabricados com precisão milimétrica segundo (AUGUSTIN et al., 2016).

Tratando-se de espalhamento espectral, tem-se como parâmetro o teorema de Shannon – Hartley, indicando a capacidade máxima de taxa de dados que pode ser transmitida em determinadas larguras de banda na presença de ruídos (SEMTECH, 2015). Considerando o teorema de Shannon é possível observar que em um sinal com a relação sinal/ruído fixa, apenas a largura de banda precisa ser modificada (SEMTECH, 2015). Detalhes da camada física são discutidos na próxima seção. Complementando a técnica de espalhamento espectral, a modulação trabalha com a técnica de *Forward Error Correction* (FEC), aumentando a sensibilidade do receptor, tornando o sinal resiliente a interferência e a ruídos externos (LOGINOV et al., 2018).

Para criar uma rede, a camada de controle de acesso ao meio é necessária. A camada lógica da rede (camada MAC, Servidor de Rede e Servidor de Aplicação), recebe o nome de LoRaWAN. A associação da camada física LoRa com a camada lógica da rede LoRaWAN constituem a rede LoRaWAN. Desse modo, dispositivos terminais conectam-se na rede, sendo estabelecidos os parâmetros de frequência e taxas de transmissão através da camada lógica da rede (MATNI et al., 2020). Um modelo de camadas de funções para a tecnologia LoRaWAN é mostrado na Figura 1.

Uma das principais características da LoRaWAN é sua topologia em estrela. As redes em estrela diminuem o tráfego de rede quando se trata de roteamento de informações se comparada a outras topologias. Entretanto, para tornar as redes em estrela de longo alcance viáveis, o gateway deve ter uma capacidade muito alta para receber uma grande quantidade de mensagens dos nós de uma topologia. Esta capacidade é alcançada utilizando dados adaptativos que avaliam e usam um transceptor multi-canal e multi-modem no gateway para que mensagens simultâneas em vários canais possam ser recebidas (ALLIANCE, 2015).





**Figura 1:** Arquitetura LoRaWAN

## LoRa - Camada física

A camada física da rede LoRaWAN (LoRa PHY) utiliza tecnologia de propriedade da empresa Semtech. LoRa usa a tecnologia de modulação CSS, desenvolvida originalmente para aplicações de radar e utilizada em aplicações militares. A modulação CSS é uma técnica de codificação para transmissão digital de sinais que usa uma tecnologia de espalhamento do sinal a ser transmitido no espectro de frequência gerando um sinal de portadora de chirp. Os pulsos de radar de alta intensidade comprimido, ou chirp, são sinais que possuem amplitude constante e varrem toda a largura de banda, variando a frequência de maneira linear em um determinado espaço de tempo. Se a frequência é alterada da menor para a maior, diz-se que é um sinal de *up-chirp*, se a frequência é alterada do maior para o menor, chama-se de *down-chirp* (ZORBAS et al., 2019).

Quando se trata de espalhamento espectral, um importante conceito deve ser abordado, o teorema de Shannon – Hartley. Teorema este que indica a capacidade máxima de taxa de dados que pode ser transmitida em determinadas larguras de banda na presença de ruídos (SEMTECH, 2015). Dessa maneira, a capacidade do canal pode ser expressa através da Equação 2.1.

$$C = B + \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.1)$$

onde, C refere-se a capacidade do canal (bits/s); B é a largura de banda (Hz); S representa a potência média do sinal recebido (watts); N é a potência média de ruído ou interferência (watts); S/N refere-se a taxa de sinal/ruído (SNR) expressada como uma taxa de potência média. Realizando a manipulação da equação para log de base natural e, sabendo que  $\ln = \log_e$ ; obtém-se a Equação 2.2.

$$\frac{C}{B} = 1,433 * \frac{S}{N} \quad (2.2)$$

Na aplicação de espalhamento espectral, sabe-se que a taxa sinal/ruído é consideravelmente baixa, uma vez que o sinal de potência está frequentemente abaixo do esperado. Desta forma, assume-se que a razão  $S/N$  é muito menor que 1, podendo escrever de acordo com a Equação 2.3:

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (2.3)$$

ou, ainda, como a Equação 2.4.

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (2.4)$$

Baseado nas equações apresentadas, é possível observar que em um sinal com a relação sinal/ruído fixa, apenas a largura de banda precisa ser modificada (SEMTECH, 2015).

Existem diversos métodos que realizam o espalhamento espectral de sinais, contudo, a mais utilizada é o de sequência direta *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Nesse método, a fase portadora do transmissor é alterada de acordo com uma sequência de código. Este processo geralmente é realizado multiplicando o sinal de dados desejado por um código de espalhamento, também conhecido como uma sequência de quebra. A sequência de quebra ocorre em uma taxa muito mais rápida do que o sinal de dados e, portanto, espalha a largura de banda do sinal para além da largura de banda original ocupada apenas pelo sinal original. O termo quebra é usado para distinguir os bits codificados mais curtos dos bits não codificados mais longos do sinal de informação (SEMTECH, 2015). Entretanto, no receptor, o sinal transmitido é novamente multiplicado por uma sequência de códigos, denominada sequência de chips, igual ao da transmissão, levando este sinal novamente à largura de banda original, finalizando a transmissão.

Na técnica DSSS, a gama de espalhamento espectral depende da quebra por bit, que é a sequência de quebras para uma dada taxa de dados desejada, onde é chamado de ganho de processamento. Neste caso, utiliza-se as seguintes taxas:

- $R_c$  - Taxa de chips (Chips/segundo);
- $R_b$  - Taxa de transmissão de bits (bits/segundo).

Além do ganho de processamento inerente à transmissão desejada, os sinais de interferência também são reduzidos e espalhados com largura de banda maior que a do sinal a ser transmitido. Dessa forma, o receptor pode filtrar os sinais indesejados facilmente. Neste caso, o espalhamento espectral DSSS é amplamente utilizado em aplicativos de comunicação de dados. No entanto, existem desafios para dispositivos e redes de baixo custo ou que exigem baixo consumo de energia. Geralmente, como nos casos dos *Global Positioning Systems* (GPSs), que também utilizam a técnica do DSSS, o sistema exigirá um *clock* de referência altamente preciso e, portanto, custoso. Além disso, quanto mais longo o código de espalhamento, maior o

tempo necessário pelo receptor para realizar uma correlação ao longo de todo o comprimento da sequência de código, ou por busca sequencial, através de sequências de código ou implementação de múltiplos correlacionados em paralelo (SEMTECH, 2015).

Devido a limitação e os problemas da técnica DSSS, o método CSS busca prover uma comunicação de baixo custo e consumo de energia. A utilização de toda a largura de banda do canal de transmissão faz com que o método se torne robusto em relação ao ruído do canal e a desvios de frequência causados pelo uso de cristais de baixo custo ou mesmo causados pelo efeito Doppler, tornando-se uma boa opção para comunicações móveis, na qual este efeito é relevante (Liao et al., 2017). Dessa maneira, vários parâmetros estão disponíveis para configuração e ajustes da modulação LoRa, tais como:

- largura de banda (BW),
- fator de espalhamento (SF),
- taxa de código (CR).

A largura de banda, por sua vez, possui três larguras programáveis: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz nas especificações gerais do LoRa. Os demais parâmetros são abordados nas seções posteriores.

### **Taxa de codificação**

A taxa de codificação ( $T_c$ ) tem relação direta com a técnica FEC, utilizada pelo LoRa. A taxa de código (CR) define quantos bits são utilizados para dados de redundância na mensagem, a fim de realizar a recuperação de erros. Quatro valores de  $T_c$  são definidos para serem utilizados, sendo estes:  $4/5$ ,  $4/6$ ,  $4/7$ , e  $4/8$ . Uma taxa de codificação maior oferece maior proteção, contudo, aumenta o tempo de propagação no ar, i.e., *time on air* (BOR et al., 2016).

### **Fator de espalhamento**

Segundo (SEMTECH, 2015), são definidos seis valores diferentes para o parâmetro de fator de espalhamento, sendo eles: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12. Devido ao uso da técnica de espalhamento pelo LoRa, grandes sequências de bits são codificadas em um único símbolo, reduzindo assim o SNR e interferência de outras frequências nas transmissões de dados. Tabela 1 são exibidos os valores teóricos de taxa de transmissão para diferentes fatores de espalhamento. Por exemplo, para uma CR igual a  $4/5$  (a menor redundância no FEC) e uma largura de banda de 500 kHz (a maior largura).

## **2.3 Rede Mesh**

É importante destacar neste capítulo de fundamentação teórica sobre as redes mesh. Segundo Prade (PRADE et al., 2020), as redes mesh, também conhecido como rede em malha,

**Tabela 1:** Valores teóricos de taxa de transmissão em função do SF

Fator de Espalhamento	Taxa de Transmissão Teórica (bits/s)
SF7	21875
SF8	21500
SF9	7031
SF10	3906
SF11	2148
SF12	1172

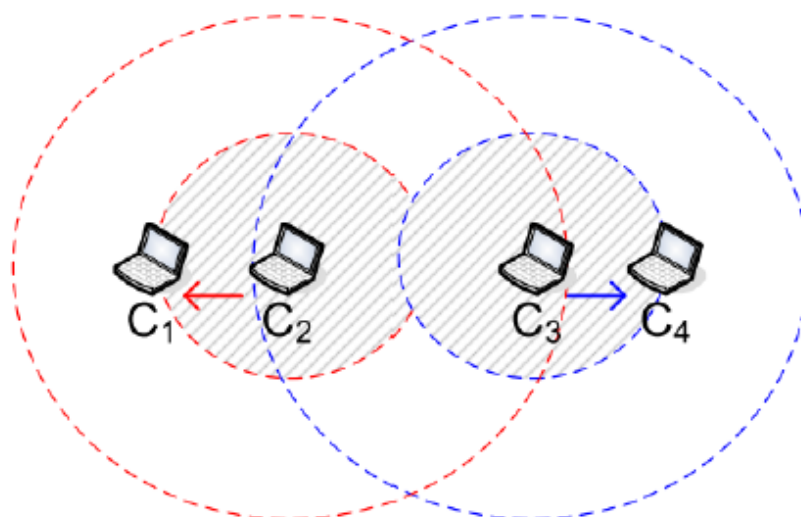
frequentemente fazem uso de comunicação sem fio por meio de rádio, também é conhecido como WMN *Wireless Mesh Network*. Uma rede mesh é formada por diversos dispositivos que são interligados. Esses dispositivos podem atuar como roteadores, possuindo conexão com outras redes e funcionando como gateway. Os dispositivos clientes podem realizar o encaminhamento de pacotes de outros nós dentro da mesma rede, fazendo com que a área de cobertura seja ampliada. Dessa forma, é possível criar uma rede que se reconfigura em razão do tráfego de controle e dados, da localização dos dispositivos e da disponibilidade de link (KARAOĞLAN ALTOP et al., 2017).

As WMNs podem caracterizar uma opção de custo baixo para prover conectividade. Cada nó pode atuar como um comutador na rede, possibilitando que a arquitetura seja expansível por meio da utilização de múltiplos saltos na conexão dos dispositivos. Segundo Prade (PRADE et al., 2020), o grande desafio nesse tipo de rede é garantir os parâmetros de qualidade exigidos pelas aplicações que fazem uso da rede. Para aplicações de tempo real com restrições rígidas, as WMNs não são indicadas. Entretanto, para prover conectividade em sistemas com parâmetros de tempo mais flexíveis, sua aplicação pode ser considerada adequada. Os pontos em destaque ao utilizar essa topologia de rede são:

- baixo custo, pois não exige infraestruturas complexas de implementação;
- autoconfiguração, pois os dispositivos descobrem os nós vizinhos e as rotas para os dispositivos desejados;
- disponibilidade, devido a cada um dos dispositivos atuarem como comutadores, rotas alternativas podem ser criadas caso algum dispositivo deixe de comunicar com a rede.

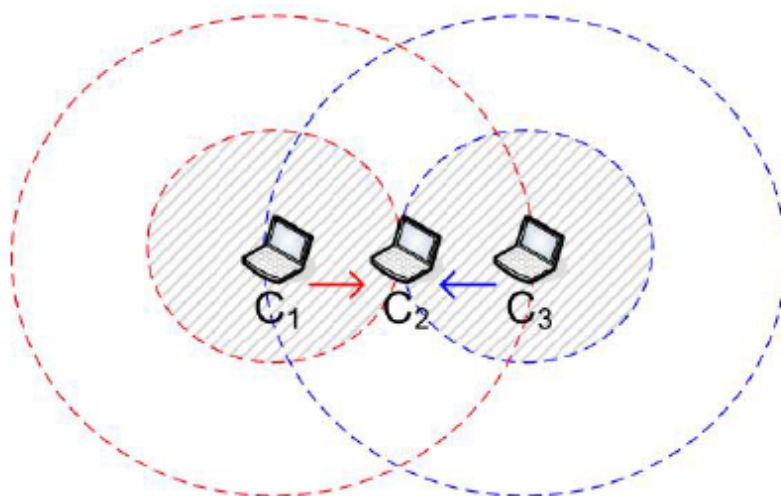
As características do rádio *half-duplex*, utilizado na comunicação entre nós em uma rede em malha, acarretam problemas clássicos, como o problema do terminal exposto e terminal escondido. Ambas as ocorrências prejudicam a vazão da rede. A Figura 2 apresenta o problema do terminal exposto, onde a área de transmissão dos nós das redes C2 e C3 são delimitadas pelos círculos menores. Os círculos maiores representam, respectivamente, as áreas de interferência geradas quando os nós C2 e C3 transmitem. Assim, para o nó C2, o círculo maior representa o ruído detectado no canal, quando o nó C3 transmite para o nó C4. Com o sinal recebido por

C2, não é suficiente identificar o conteúdo transmitido, mas é suficiente para tomar a decisão de não utilizar o canal. Esse problema, segundo Semtech (SEMTECH, 2015), é minimizado com o esquema de modulação utilizado pela tecnologia LoRa, que reduz o impacto de sinais interferentes e pode ser facilmente removido por filtragem. Por esse motivo, não representa um problema crítico para o terminal exposto.



**Figura 2:** Problema clássico do terminal exposto em redes de malha

O problema do terminal escondido ocorre quando dois nós não conseguem detectar a presença um do outro e transmitem, gerando, assim, colisão. Na Figura 3 ilustra o problema, onde o nó C1 não recebeu a solicitação de transmissão de C3 para C2. Além disso, C3 não percebeu a solicitação de C1 para C2. Tanto C1, quanto C3, transmitem para C2 e este não é capaz de receber nenhum dos dados. Esse problema ocorre porque ambos os transmissores não compartilham a mesma área de transmissão.



**Figura 3:** Problema clássico do terminal escondido em redes em malha

As redes que utilizam o padrão LoRa fazem uso de dois principais elementos: o PHY LoRa,

que é responsável pela transmissão dos dados através de frequências de rádio, utilizando técnicas de modulação específicas; e um protocolo de acesso ao meio, i.e., a camada MAC. Um dos protocolos abertos desenvolvido pela Aliança LoRa é denominado LoRaWAN (SEMTECH, 2015). Vale destacar que existem outras implementações de protocolos MAC compatíveis com o PHY LoRa como, por exemplo, o protocolo DASH7 (ERGEERTS et al., 2015). Recentemente, implementações experimentais usando o PHY LoRa e a topologia mesh foram apresentadas.

Na década de 1990 houve um rápido crescimento dos interesses de pesquisa em redes ad hoc móveis. A natureza dinâmica e sem infraestrutura dessas redes exige que um novo conjunto de estratégias de rede seja implementado para fornecer comunicação eficiente de ponta a ponta. Isso, juntamente com a aplicação diversificada dessas redes em muitos cenários diferentes como áreas rurais agricultáveis e criação de animais, fez com que as essas redes fossem pesquisadas por muitas organizações e institutos diferentes. No entanto, devido à sua mobilidade e ao recurso limitado em redes sem fio, cada camada do modelo requer redefinição ou modificações do protocolo para funcionar de forma eficiente, tornando um área de pesquisa interessante (ABOLHASAN; WYSOCKI; DUTKIEWICZ, 2004).

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo são apresentados trabalhos relacionados ao tema proposto afim de discutir oportunidades de avanço no estado da arte, no que se referente a rede multi-rádio e *multi-hop*. Na Seção 3.1 é apresentada a metodologia para a seleção de artigos para o embasamento do trabalho. Na Seção 3.2 são apresentados os trabalhos relacionados no intuito de evidenciar o estado da arte e as pesquisas realizadas na área. Por fim, na Seção 3.3 é apresentado um quadro comparativo entre os modelos encontrados na literatura para enfatizar os principais pontos de interesse para o desenvolvimento do presente trabalho.

#### 3.1 Metodologia da revisão sistêmica da literatura

Como embasamento científico, realizamos revisão sistêmica da literatura com seguintes objetivos:

- confirmar que redes LoRa mesh são soluções de baixo consumo energético e ampla cobertura aplicada aos mais variados e complexos cenários de IoT;
- identificar quais os modelos e métodos mais empregados como solução para *wireless mesh network* voltados para IoT, utilizando LoRa.

Como base de pesquisa para revisão da literatura foi utilizada a plataforma Scopus, esta é consolidada como um dos maiores buscadores dos principais banco de dados disponível para pesquisa científicas acadêmica. Além disso, o Scopus fornece como benefício curadoria para os artigos indexados, permitindo eliminar através de filtros na pesquisa a maioria dos resultados com menos relevância científica ao tema pesquisado. Para tanto, refinou-se uma *string* de busca que resultou nos trabalhos base para revisão sistêmica da literatura.

*TITLE-ABS-KEY ( lora AND mesh ) OR ( lora AND mesh AND architecture ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) )*

A consulta tem como objetivo filtrar artigos que citam explicitamente as palavras *LoRa mesh* e *Architecture*. A consulta resultou em 198 artigos, até maio de 2021. A seguir, descreve-se os trabalhos com foco em multi-rádios e comunicação *multi-hop* para rádios LoRa. Em cada trabalho, discute-se suas vantagens e desvantagens. Além disso, definiu-se um grupo de trabalhos focado em multi abordagens de rádio.

#### 3.2 Descrição dos principais trabalhos

Mikhaylov et al., (MIKHAYLOV et al., 2018) investigaram a viabilidade de criar um sistema de rede de longa distância de baixa potência (LPWAN) *multi-Radio Access Technology* (RAT)

que pode cumprir os requisitos de transmissão em um cenário onde *Narrow Band IoT* (NB-IoT) e *Long Term Evolution* (LTE) coexistiram. Os autores construíram um protótipo de dispositivo que inclui um *chipset* NB-IoT que lida com a comunicação de eventos e implementa o módulo LoRaWAN. Além disso, os autores testaram o dispositivo LPWAN *dual-RAT* em um NB-IoT comercial e em um privado o ambiente LoRaWAN na Universidade de Tecnologia de Brno na República Checa. De acordo com as descobertas, o *chipset* NB-IoT consumiu mais de 200 mW em média para manter a sincronização da rede. No entanto, o transceptor LoRaWAN consumiu menos de 60 mW, devido a menor potência de transmissão, apesar do maior tempo de transmissão.

Huang-Chen e Kai-Hsiang (LEE; KE, 2018) propuseram um sistema de rede mesh LoRa para coletar dados de sensores IoT implantados em uma grande área geográfica. Além disso, os autores analisaram o desempenho de comunicação da rede mesh LoRa proposta, onde o resultado obtido mostra que a rede mesh LoRa apresenta melhor desempenho de entrega. O módulo de rede mesh LoRa pode ser integrado a outros aplicativos de IoT para coletar dados de sensores distribuídos, ignorando problemas complexos de transmissão e coleta de dados. Os usuários não precisam saber como construir uma rede para rotear os dados, porque os protocolos de comunicação estão contidos no módulo. Essa solução simplifica significativamente a comunicação sem fio de longo alcance e facilita os aplicativos de IoT em grandes regiões.

Kim et al., (KIM et al., 2016) implementaram um sistema de IoT multi-interface baseado em dispositivo em Wi-Fi e LoRa usando um sistema de dados de sensor. O dispositivo multi-interface coleta dados de cada sensor e os redireciona para um dos dois manipuladores, considerando que (i) o manipulador de Wi-Fi carrega o pacote sem fio via Wi-Fi e (ii) o LoRaWAN *handler* envia os dados do sensor por meio da rede do módulo LoRaWAN. O multi-dispositivo de interface seleciona a melhor abordagem (Wi-Fi ou LoRaWAN) para transmitir o pacote com base no tipo de dados usando um agendador de energia e dados. Os autores avaliaram o desempenho implantando uma infraestrutura real com um cenário na praia (AP wireless LAN, estação e gateway LoRaWAN). Os resultados numéricos mostram que conforme a distância aumenta, o valor *Received Signal Strength Indication* (RSSI) e diminuição da taxa de dados, demonstrando a sensibilidade do cartão Wi-Fi. Os resultados RSSI são semelhantes em ambas as antenas a qualquer distância, e quanto maior o ganho da antena, maior o valor SNR.

Queralta et al., (QUERALTA et al., 2019) planejaram uma estrutura de engenharia para gerenciar IoT-estruturas de serviços médicos baseados, especialmente, na verificação de eletrocardiografia de estruturas que precisam desempenhar a preparação de informações. Os autores consolidaram o processamento de borda e névoa utilizando LoRaWAN. Além disso, utilizaram aprendizado de máquina para a construção de uma estrutura de cinco camadas, particularmente, camada de sensor, camada de borda, camada de névoa, camada nuvem e a camada de aplicação. Para aprovar a viabilidade do projeto, os autores dirigiram seus ensaios em um clima metropolitano em Turku, Finlândia. Os resultados da avaliação mostram que a prova de distinção da ocasião acontece com um nível médio de exatidão de mais de 90% e uma revisão regular de



mais de 95% na detecção de queda por meio desta engenharia.

A literatura apresenta algumas estratégias para *multi-hop* entre gateways. Lundell et al., (LUNDELL et al., 2018) apresentaram um protocolo baseado em *Hybrid Wireless Mesh Protocol* (HWMP) e roteamento de vetor de distância sob demanda Ad-hoc (AODV) para melhorar a comunicação da rede e fornecer ampla cobertura. O protocolo de roteamento define as operações dos gateways, quando recebe um *uplink* de um dispositivo final. O nó raiz do cenário é usado para roteamento, o gateway verifica um caminho válido para o nó raiz e, em caso afirmativo, transmite o pacote. No entanto, se tal forma não existe ou o nó raiz não é usado, o gateway faz uma descoberta de rota. Caso contrário, se o gateway for o destino com conectividade com a Internet, ele desencapsula o pacote de dados para obter a mensagem LoRaWAN original, transfere-o para o servidor de rede e aguarda uma resposta. Neste contexto, o método de roteamento é transparente para os dispositivos finais e o servidor de rede.

Dwijaksara et al., (DWIJAKSARA et al., 2019) apresentou um protocolo gateway-a-gateway LoRa *multi-hop* de comunicação que executa explicitamente todas as três restrições, ou seja, tamanho do pacote, ciclo de trabalho e tempo necessários em redes LoRa. A proposta do protocolo apresenta duas funcionalidades de roteamento e acesso ao canal. O protocolo de roteamento encontra uma rota de um dispositivo final para o servidor de rede (ou seja, uma lista de gateways de encaminhamento). O esquema de acesso do canal designa o mecanismo de transmissão de pacotes dentro de dois gateways. Além disso, *multi-hop* considera que os dispositivos finais fizeram progressos nos últimos anos, por exemplo, Anneda et al., (ANEDDA et al., 2018) descreve uma solução chamada e2McH, realizando energia-comunicações eficientes em roteamento LoRaWAN *multi-hop* entre a extremidade de dispositivos. O algoritmo visa encontrar o dispositivo final vizinho mais próximo do gateway e o melhor caminho para transmitir dados ao servidor de rede.

Ebi et al., (EBI et al., 2019) introduziram uma arquitetura LoRaWAN que visa mitigar o monitoramento de infraestrutura subterrânea. A arquitetura compreende dispositivos de sensor que constroem uma rede de malha LoRa que publica dados em uma rede de dispositivo aquecedor, que funciona como dissipador dos sensores. O dispositivo repetidor corresponde diretamente ao gateway central, e pode ser uma mera bateria do dispositivo final energizado, que não está conectado à Internet. Enquanto o sensor de dispositivos serve como roteadores na rede mesh, o nó repetidor funciona como um relé que entrega os dados ao gateway. Os autores realizaram testes em dois departamentos como uma prova de conceito. Dispositivos repetidores e roteadores possuem restrição de energia, canal único (repetidor com dois rádios) e executam um mecanismo de sincronização.

Dias e Grilo (DIAS; GRILO, 2020) desenvolveram um protocolo de roteamento que usa o *beacon* do LoRaWAN para entregar pacotes de dispositivos finais para gateways por meio de um mínimo número de saltos. A solução é uma adaptação do *Destination-Sequenced Protocol Distance Vector* (DSDV), onde os roteadores do dispositivo final são estáticos, e existe sincronização entre os nós. Além disso, os dispositivos finais são classificados em duas variedades: os

nós de roteamento e os nós folha, onde os dispositivos de roteamento não têm restrição de energia. Além disso, Sisinni et al., (SISINNI et al., 2019) validam e implementam um protótipo de prova de conceito para um nó aprimorado (e-Node) LoRaWAN, em um cenário industrial para estender a cobertura de mensagens transmitido usando as taxas de dados mais altas. Os autores apresentaram testes de cobertura para medir a intensidade do sinal para garantir o desempenho adequado da proposta e demonstrar sua eficácia em aumentar o alcance.

Finalmente, Mamour e Congduc (MAMOUR; CONGDUC, 2019) propuseram uma solução *multi-hop* para estender a cobertura da rede LoRa em áreas rurais. Os autores introduziram um encaminhador de mensagem simplista e um método de sincronização. Além disso, o objetivo principal é produzir um dispositivo de relé de nó intermediário inteligente, transparente e operado por bateria, para permitir um salto extra entre os dispositivos separados e o gateway.

### 3.3 Categorização dos artigos selecionados

Para melhor entendimento dos artigos descritos na fase de revisão sistemática, foi realizado uma organização por categoria, identificando os pontos em comum. Os questionamentos relevantes para a categorização, bem como os resultados, foram detalhados a seguir.

**Tabela 2:** Estudos analisados sobre multi-hop e multi-rádio em cenários de grande escala

Trabalhos	Ano	<i>Multi-hop</i>	Multi-rádio	Requisitos
(QUERALTA et al., 2019)	2019	-	Multi-rádio	Médico
(MIKHAYLOV et al., 2018)	2018	-	Multi-rádio	-
(KIM et al., 2016)	2016	-	Multi-rádio	-
(LUNDELL et al., 2018)	2018	Gateways	-	-
(DWIJAKSARA et al., 2019)	2019	Gateways	-	-
(ANEDDA et al., 2018)	2018	Dispositivo IoT	-	-
(EBI et al., 2019)	2019	Dispositivo IoT	-	Infra Subterrânea
(DIAS; GRILO, 2020)	2020	Dispositivo IoT	-	-
(MAMOUR; CONGDUC, 2019)	2019	Dispositivo IoT	-	Área Rural
(SISINNI et al., 2019)	2019	Dispositivo IoT	-	Industrial
<b>Multi-LoRa</b>	2022	Dispositivo IoT	Multiplexação	Transmissão com prioridade

A análise deste trabalho concentrou-se em três recursos principais:

1. comunicação *multi-hop*;
2. comunicação multi-rádio;
3. requisitos de serviço para cada aplicativo

A Tabela 3 resume a revisão de multi-rádios e *multi-hop* para comunicação, com base nessa análise observa-se que nenhum trabalho considera uma arquitetura multi-rádio e *multi-hop* com reconhecimento de prioridades. Baseado na literatura, pode-se observar os trabalhos que abordam multi-rádios (LUNDELL et al., 2018; DWIJAKSARA et al., 2019; ANEDDA et al., 2018; EBI et al., 2019; DIAS; GRILO, 2020; MAMOUR; CONGDUC, 2019; SISINNI et al., 2019).

Além disso, baseado nos requisitos de aplicação, pode-se considerar apenas os trabalhos (EBI et al., 2019; MAMOUR; CONGDUC, 2019; SISINNI et al., 2019; QUERALTA et al., 2019). Para o melhor de nosso conhecimento, apenas este trabalho combina todos os recursos críticos mencionados anteriormente, mas não provendo arquitetura de comunicação LoRa *multi-hop* para IoT em cenário rural de larga escala.

Ao final da leitura completa dos artigos selecionados, observou-se quatro artigos com objetivos similares ao proposto neste trabalho, podemos observar nos resultados da pesquisa a discussão de como a rede em mesh utilizando diferentes tecnologias sem fio, incluindo o protocolo LoRa baseado em sub-GHz. Observa-se como alguns protocolos nasceram com um nativo suporte para redes mesh, enquanto outros protocolos de comunicação foram aprimorados para suportar esse tipo de rede (SCIULLO; TROTTA; DI FELICE, 2020). Concluimos em nossa pesquisa que as tecnologias consideradas, tanto padrão, quanto proprietário, adaptam-se bem a cenários em que a heterogeneidade dos dispositivos que compõem a rede mesh para IoT. Portanto, uma rede mesh de múltiplos nós aprimorados com protocolos de roteamento e múltiplos gateway é a melhor definição que pode ser usada e que melhor representa a variedade de comunicações de curto e longo alcance, bem como podem ser encontrados em cenários modernos e complexo como em cidades inteligentes e cenários do agricultura 4.0, i.e., objetivo principal deste trabalho acadêmico.



## 4 REDE MULTI-LORA

Nesse capítulo é apresentado a arquitetura de comunicação LoRa *multi-rádio* e *multi-hop*, chamada de Multi-LoRa. Primeiro, uma visão global da arquitetura Multi-LoRa é introduzida. Em seguida, detalha-se cada camada da proposta arquitetural baseado no modelo proposto.

### 4.1 Decisões de projeto

A agricultura desempenha uma importância vital no desenvolvimento de um país, onde a modernização rural surge como uma solução para melhorar a agricultura no campo e questões dos produtores segundo (GONDCHAWAR; KAWITKAR, 2016). Por exemplo, agricultura inteligente se refere a modernização dos métodos tradicionais atuais tornando-os eficiente segundo (GHASEMPOUR, 2019). Entre a agricultura inteligente, se destacam:

1. Aplicações para melhorar a qualidade do vinho, inspecionando a umidade do solo e diâmetro do tronco nas vinhas. Esses recursos fornecem o acompanhamento do desenvolvimento de vinhas e, conseqüentemente, uma boa colheita.
2. Os aplicativos domésticos gerenciam as condições do microclima para a produção de frutas e vegetais. Essas aplicações podem evitar um microclima favorável para o desenvolvimento de doenças na planta e promover o sucesso do cultivo.
3. A irrigação do campo em áreas secas reduz a quantidade de água usada, melhorando a irrigação e reduzindo custos.
4. Rede de estações meteorológicas com aplicativos que controlam as condições meteorológicas, fornecendo informações e evitando desastres.
5. Controle de umidade e nível de temperatura elevadas em matéria vegetal (fardos de algodão), derivados da colheita e armazenados a céu aberto encontrada em fazendas, permitindo melhor controle e eliminando ameaças de perdas causadas por incêndios derivados dessas variáveis. Neste contexto, a agricultura inteligente requer monitoramento em grande escala com baixo custo e coleta de dados em tempo real.

Este trabalho considera um cenário composto por  $n$  dispositivos IoT e um gateway implantado sobre uma área rural de grande escala com dimensões de 9 mil hectares e 11 km de extensão, conforme mostrado na Figura 4. Nesse cenário, cada dispositivo IoT pode atuar como um cliente e um nó de retransmissão. Os dispositivos IoT atuam como um cliente para coletar e ler os dados do ambiente e enviá-los para um gateway, considerando um *multi-hop* e comunicação LoRa multi-rádio. Dispositivos IoT implantados entre o cliente e o gateway podem atuar como um nó de retransmissão com base nas decisões de roteamento. O gateway encaminha essas mensagens de entrada usando uma rede IP para a segmentação do servidor de aplicativos

para outras operações, como sistemas analíticos. Além disso, é possível explorar outras frentes de pesquisas como um algoritmo de aprendizado de máquina para fornecer informações de precisão sobre fardos de algodão armazenados a campo ou mesmo na pecuária, obtêm exatamente o tratamento de que precisam com base em dados.



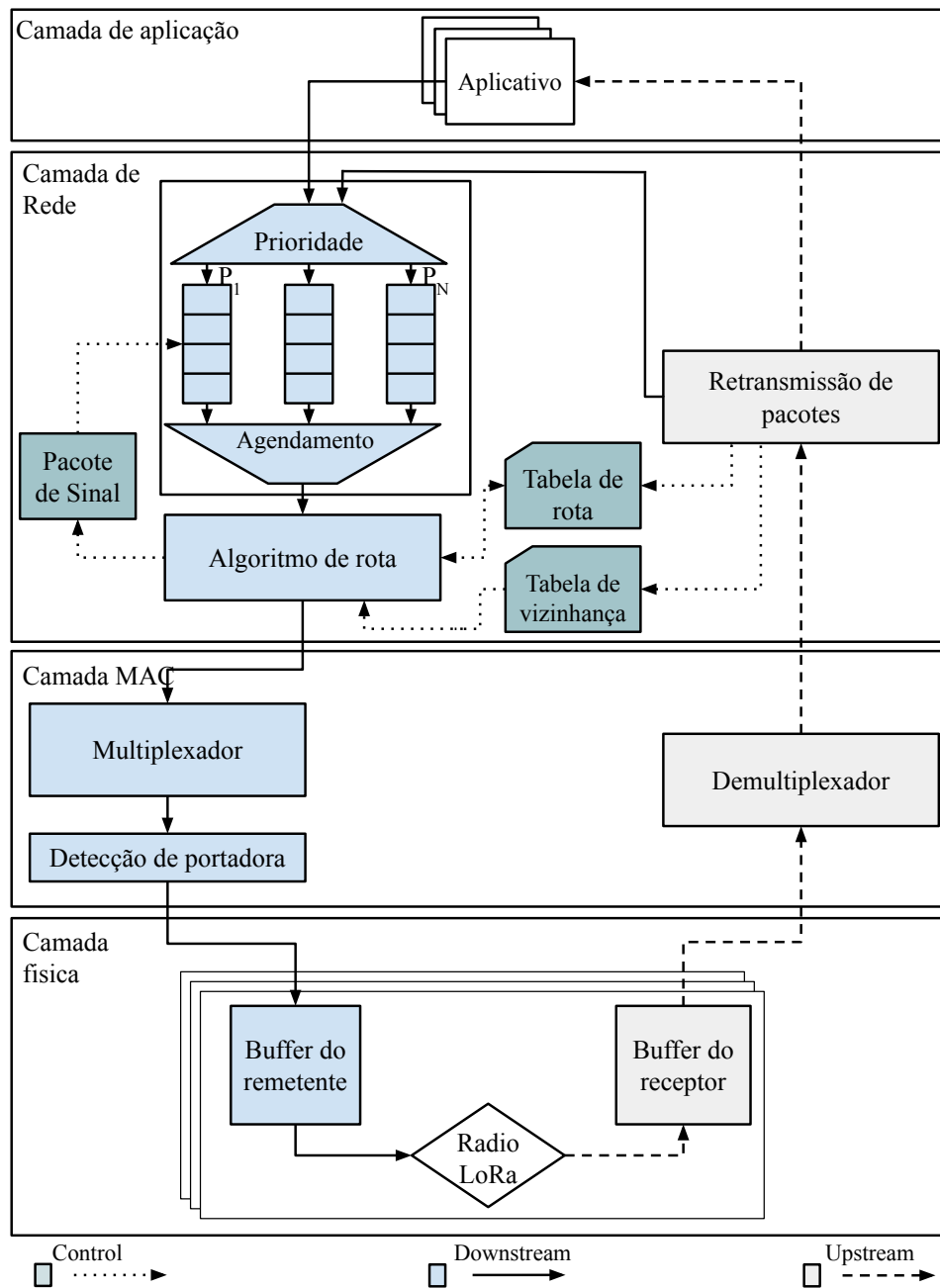
**Figura 4:** Visão geral do cenário de larga escala

## 4.2 Arquitetura de rede Multi-LoRa

A arquitetura Multi-LoRa fornece um modelo de referência para a implementação da comunicação LoRa multi-rádio e *multi-hop* para implantação de IoT em larga escala em áreas rurais. A arquitetura Multi-LoRa consiste em quatro camadas: Física, MAC, Rede e Aplicação, conforme mostrado na Figure 4. Especificamente, a camada Física considera o rádio LoRa, fornecido pela Semtech (ZHOU et al., 2019). Para as camadas superiores, existem alguns recursos esperados. Por exemplo, a camada MAC deve garantir um esquema de transmissão eficiente em vários rádios. Além disso, a camada de Rede é responsável por encaminhar os dados de roteamento para encaminhar os dados com menor sobrecarga de sinalização e comunicação *half-duplex*. Finalmente, os aplicativos IoT podem ser construídos na camada de Aplicativo. A seguir, cada camada de arquitetura é descrita.

Camada Física refere-se ao meio físico no qual a comunicação ocorre. Cada rádio considera os *buffers* do emissor e dos receptores responsáveis para receber dados da camada MAC, enviando-os através do rádio LoRa e obtendo os dados de outro rádio LoRa para encaminhá-los para a camada MAC. Por Rádio LoRa, considera-se a tecnologia sem fio LoRa (RAZA et al., 2017). O rádio possui os *chipsets* da Semtech usados em qualquer arquitetura pública, privada ou híbrida de redes, oferecendo longo alcance, baixo consumo de energia e transferência segura de dados da aplicação. Neste caso, LoRa fornece conectividade para os dispositivos IoT ao Gateway para outras operações. Ao contrário de outros sistemas sem fio, que usam modulação por chaveamento de frequência (*Frequency-Shift Keying* - FSK) para baixo consumo de energia, LoRa é baseado em CSS, como apresentado no Capítulo 2.

LoRa também mantém a mesmas características de baixa potência da modulação FSK, mas aumenta o alcance de comunicação significativamente (MOLLAH; ZEADALLY; AZAD, 2020). No entanto, comunicação *Half-duplex* causa colisões de pacotes de dados ou a incapacidade



**Figura 5:** Visão geral da arquitetura de rede

dade de enviar pacotes no mesmo canal de rádio, ou seja, problema de colisão de pacotes. Nesse sentido, multi-rádios podem mitigar este problema, reduzindo a taxa de colisão, porque usando o canal para enviar um pacote é reduzido. Portanto, vários rádios devem considerar a técnica de multiplexação de frequência. É estatisticamente possível reduzir a taxa de colisão, uma vez que o uso do canal para enviar um pacote é re-reduzido em até 50% pela fragmentação dos dados transmitidos por ambas as interfaces simultaneamente (LYU; YU; FU, 2020). O algoritmo de controle de multiplexação de frequência é responsável para a camada de controle de acesso ao meio, discutido a seguir.

A camada MAC deve gerenciar de forma eficiente a camada de controle de acesso de vários

rádios e controlar a sincronização entre dispositivos IoT que desejam transmitir dados (BABAE; SHARIFIAN, 2018). Portanto, é essencial projetar a camada MAC para permitir comunicação LoRa *multi-hop* e multi-rádio da forma mais simples possível. Dentro desta forma, a camada MAC considera o Multiplexador, Demultiplexador e módulo de portadora de detecção. Além disso, a camada MAC é responsável por avaliar se o meio sem fio está disponível para transmitir pacotes usando o módulo de detecção. Especificamente, considera-se o protocolo *Listen-Before-Talk* (LBT) de comunicação, onde um transmissor de rádio primeiro detecta seu ambiente de rádio antes de iniciar uma transmissão (DANTAS et al., 2021). LBT pode ser usado por um dispositivo de rádio para descobrir se uma rede em que o dispositivo tem permissão para operar ou para encontrar um canal de rádio para trabalhar. Ao contrário das camadas MAC implementadas no tradicional Redes TCP/IP, a camada MAC da arquitetura Multi-LoRa não considera nenhum algoritmo para lidar com colisões. Nesta arquitetura, a camada de aplicativo é responsável por gerenciar colisões por dois motivos: (i) para manter o meio de controle de acesso o mais simples possível com baixa sobrecarga; e (ii) o aplicativo já considera o modelo de comunicação de solicitação e resposta, permitindo verificar a entrega e retransmissão do pacote em caso de perda de pacotes.

A camada MAC considera o esquema de transmissão de diversidade de frequência para enviar pacotes de sinalização do protocolo de roteamento, permitindo a verificação do valor do RSSI para cada rádio independentemente (BABAE; SHARIFIAN, 2018). Esta verificação é devido a transmissão de diversidade de frequência e esse esquema permite transmitir a mesma informação simultaneamente, por todos os rádios. Além disso, os pacotes de sinalização são pacotes minúsculos e sua fragmentação em dois pacotes resulta em um cabeçalho de pacote maior do que as informações válidas. Especificamente, a fragmentação de dados em vários pacotes para transferir em várias interfaces deve resultar em um cabeçalho de pacote mais extenso do que a carga útil, reduzindo a eficiência de transmissão. No entanto, considera-se o esquema de multiplexação de frequência para o envio de pacotes contendo dados de aplicativos, onde os dados são particionados entre as duas interfaces disponíveis para ser enviado simultaneamente. Além disso, a camada MAC considera o Demultiplexador para receber os pacotes, através das interfaces de rádio disponíveis, verifica os dados recebidos e concatena-os em um único pacote, usando um identificador como referência. Portanto, este pacote é encaminhado para a camada de Rede. Se um fragmento de pacote não for recebido, todo o pacote é descartado e não enviado para a camada superior.

A camada de rede é responsável por encaminhar os dados para seu endereço final dentro da rede. Esta camada consiste no algoritmo de roteamento, na tabela de vizinhança, programação e retransmissão de pacotes. A tabela de vizinhança em cada nó consiste nas seguintes 4 tuplas: endereço do nó, número de sequência, métrica e prioridade. Especificamente, o endereço do nó significa o endereço do nó vizinho. O número de sequência denota a última mensagem recebida, usado para calcular a taxa de perda de pacotes. A métrica representa a qualidade do link do endereço vizinho, como RSSI ou taxa de perda de pacotes. Além disso, a prioridade



significa a relevância do aplicativo que este cliente está calculando para tratar, por exemplo, é usado pelo módulo de agendamento de pacotes. Nesse contexto, cada nó deve manter atualizada uma tabela de vizinhos com base nos dados coletando informações de pacotes de aplicativos e mensagens de sinalização. Assim que um pacote de aplicativo não for enviado após um período de tempo limite especificado, uma mensagem de sinalização é enviada pelo módulo de algoritmo de roteamento para garantir que um nó não seja eliminado da tabela de roteamento de um nó vizinho.

Cada nó também tem uma tabela de roteamento composta pelas seguintes 6 tuplas: destino, próximo salto, distância, número de sequência, métrica e prioridade. Especificamente, destino significa um endereço para uma determinada rota. O próximo salto denota o endereço necessário para chegar ao destino. A distância é o número de salto para chegar ao endereço de destino usado para descartar o pacote se exceder o número para evitar *loops*. O número de sequência significa o número do último pacote de aplicativo recebido do destino, usado para calcular a perda de pacotes para esta rota. A métrica representa a qualidade do link entre o endereço de destino e seu salto final. Finalmente, a prioridade significa a preferência do aplicativo que este usuário está configurado para lidar. É fundamental destacar que esta arquitetura não foi projetada para um protocolo de roteamento específico e, portanto, definir um conjunto de campos padrão para roteamento e tabelas de vizinhança. Portanto, as tabelas podem ser estendidas para adicionar novos campos, dependendo das necessidades do protocolo.

O módulo de retransmissão de pacotes é responsável por receber da aplicação pacote ou mensagem de sinalização da camada MAC e entregá-lo ao módulo de retransmissão. O módulo de retransmissão de pacotes atualiza a tabela de vizinhança para cada pacote de aplicativo recebido ou mensagem de sinalização em termos de controle em formação. Além disso, este módulo atualiza a tabela de roteamento para cada mensagem de sinalização durante o processo de descoberta de rota. O módulo de retransmissão de pacotes oferece o pacote para a camada de aplicativo, caso contrário, ele fornece o módulo de agendamento para encaminhar o pacote ao seu endereço final na rede.

O módulo de algoritmo de roteamento é responsável por definir a rota para chegar ao endereço de destino e encaminhar os dados para seu endereço final dentro da rede. Desta forma, o algoritmo de roteamento mantém a tabela de roteamento de integração em cada nó, adicionando, atualizando e removendo rotas com base no protocolo de roteamento, enviando mensagens de sinalização. Por exemplo, o algoritmo de roteamento de envio pode encaminhar o pacote de dados para seu último endereço dentro da rede com base na tabela de roteamento. O protocolo de roteamento para este tipo de rede deve ser projetado tendo em mente as mudanças de topologia ao longo do tempo. Além disso, a largura de banda disponível do rádio LoRa é limitada e não deve ser desperdiçado em decisões de protocolo e tráfego de cabeçalho. Portanto, é necessário fornecer um protocolo de roteamento que atenda a rede LoRa multi-rádio e *multi-hop*, como a limitação do tamanho do pacote que leva à menor sobrecarga de sinalização e uso de comunicação *half-duplex*, com base nas informações padrão da tabela de vizinhança, a decisão

de roteamento pode ser baseada na contagem de saltos, sucesso do pacote e qualidade do link. Muitos algoritmos ad hoc preferem definir rotas com base em um número menor de saltos, a menos que a taxa de sucesso dos pacotes caia abaixo de um limite específico. Existe, atualmente, uma ampla gama de protocolos ad-hoc, como o protocolo de roteamento Babel (RFC 8966) (CHROBOCZEK; SCHINAZI, 2021), que contam com as informações disponíveis sobre os vizinhos e tabelas de roteamento usadas em nossa arquitetura.

É essencial considerar os requisitos chave da aplicação individualmente, em vez de uma solução única. Nesse sentido, o módulo Prioridade trabalha com filas para priorizar a transmissão de pacotes com base na prioridade do aplicativo para atender a qualidade necessária para cada aplicativo IoT de forma eficiente (KIM; KIM, 2019). A arquitetura suporta qualquer número de filas, onde definiu-se três filas como valor padrão, ou seja, fila de baixa prioridade, normal e de alta prioridade. O módulo de retransmissão de pacotes enfileira um pacote na fila correspondente com base na prioridade do aplicativo. Por padrão, definiu-se que o pacote de sinal tem baixa prioridade, devido às suas características estáticas em seus nós. Além disso, especificou-se a política de agendamento para consumir os pacotes prioritários primeiro, para enviar para a camada MAC.

A camada de aplicativo pode coexistir com vários aplicativos com diferentes requisitos de qualidade em cenários rurais de IoT em grande escala. Por exemplo, é essencial para transmitir aplicativos de dados por rádio LoRa com vários atrasos e requisitos de rendimento com cobertura mais alta. Portanto, definiu-se três níveis de prioridade como padrão, ou seja, 1, 2 e 3, para representar alto, médio e baixa prioridade de aplicação, respectivamente (DAWALIBY et al., 2019). Por exemplo, um grupo de alta prioridade requer baixa latência e intervalos de transmissão de mensagens e baixa tolerância para perda de dados. No entanto, um grupo de prioridade média requer alta confiabilidade e baixa latência, mas menor do que a alta prioridade. Finalmente, uma baixa prioridade são aqueles com uma alta tolerância de atraso.

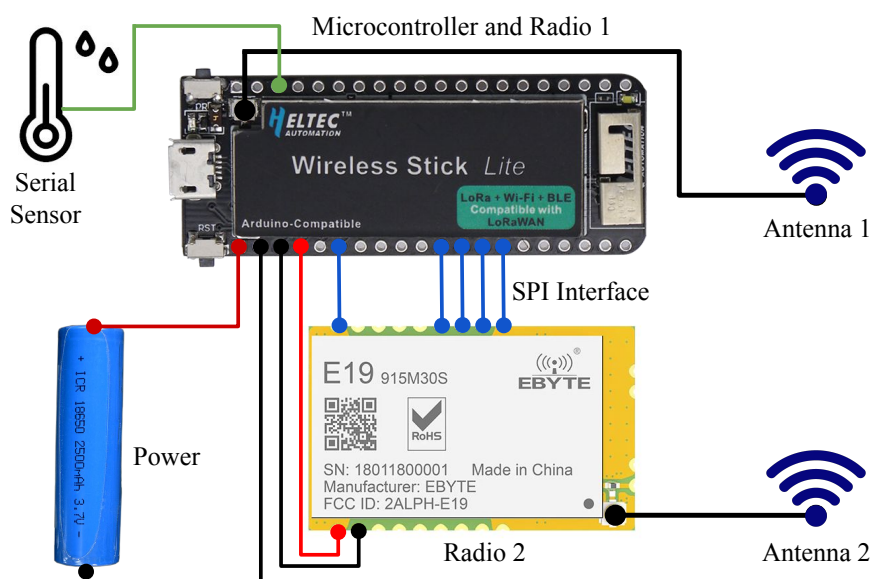
A camada de aplicação deve implementar a dependência do mecanismo de confiabilidade sobre os requisitos de aplicação, uma vez que a camada MAC detecta apenas o meio físico sem detectar colisões. Por exemplo, o aplicativo pode considerar o modelo de comunicação de solicitação e resposta, permitindo que a aplicação verifique a entrega de pacotes e retransmita, no caso de perda de pacotes. Assumiu-se que a rede Multi-LoRa proposta é proprietária, portanto, não foi considerado promiscuidade na priorização dos pacotes por parte da aplicação que operam sobre esta rede. O roteamento de redes ad hoc é uma tarefa desafiadora e tem recebido muita atenção dos pesquisadores e cada autor de cada protocolo proposto argumenta que a estratégia proposta fornece uma melhoria sobre várias estratégias diferentes consideradas na literatura para um determinado cenário de rede. Portanto, é muito difícil determinar quais protocolos podem ter o melhor desempenho em vários cenários de rede diferentes, como aumentar a densidade de nós e o tráfego. Nossa pesquisa explora um protocolos de roteamento diferente inserindo-a como possível referencia nesse contexto.

## 5 PROTÓTIPO MULTI-LORA

Este capítulo apresenta o protótipo da arquitetura Multi-LoRa. Inicialmente, o hardware utilizado e o formato do pacote com base no protocolo de roteamento Babel foram detalhados. Posteriormente, as quatro principais fases de operação da arquitetura Multi-LoRa foram discutidas.

O protótipo de hardware foi desenvolvido para implementar fisicamente a arquitetura Multi-LoRa, que consiste na implementação de hardware e software, como mostrado na Figura 6. Cada nó compartilha a mesma estrutura de hardware e principal firmware. Em termos de implementação de hardware, cada nó é composto por:

- Um microcontrolador Espressif Esp32 (microprocessador LX6 dual-core de 32 bits, operando a 240 MHz e com desempenho de até 600 DMIPS, Ultra-Low-Power, co-processor, 520 KB SRAM, 448 KB ROM),
- Dois rádios LoRa SX1276 e
- Uma fonte de energia com capacidade de 2100 mAh.

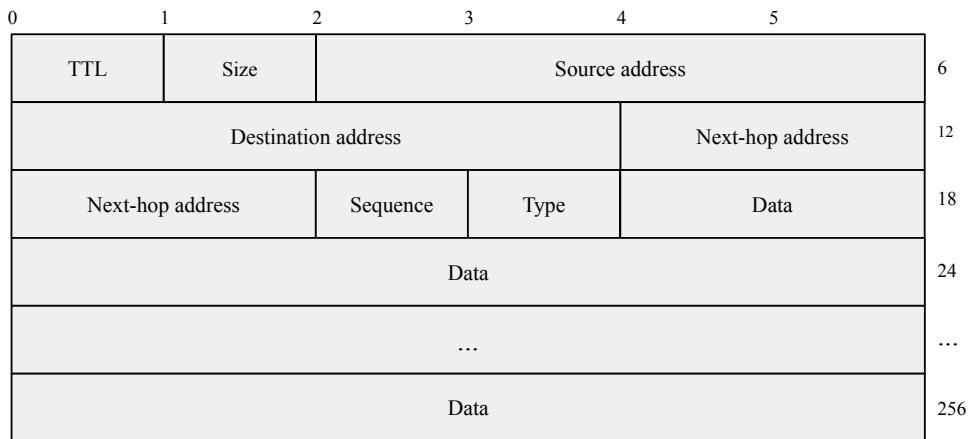


**Figura 6:** Visão geral do protótipo

Além disso, implementou-se o protocolo de camada de aplicativo, roteamento e MAC no firmware do dispositivo usando a linguagem de programação C na implementação de software. Especificamente, foi implementado o modelo de comunicação LBT na camada MAC, o roteamento do protocolo Babel (RFC 8966) na camada de rede e Modbus, na camada de aplicação.

Um protocolo foi projetado para implantar o protótipo, considerando os limites de situações de um rádio LoRa para trocar informações de controle e dados. Nesse sentido, o protocolo

de roteamento Babel (RCF 8966) (CHROBOCZEK; SCHINAZI, 2021) foi adaptado para o protótipo, uma vez que é amplamente utilizado e facilmente implementado. Por exemplo, o formato do pacote foi adaptado para o tamanho do quadro LoRa, ou seja, 256 bytes. Isso significa considerar apenas 4 bytes para cada endereço, ou seja, origem, destino e próximo salto, enquanto o Babel considera 16 bytes para cada endereço IPv6 ou 16 bytes para cada endereço IPv4. Portanto, o cabeçalho do pacote de Multi-LoRa tem 16 bytes, enquanto o cabeçalho do pacote do protocolo de roteamento Babel tem 44 a 60 bytes, considerando o endereço IPv6 ou 60 bytes considerando o endereço IPv4. Dessa forma, a carga útil do pacote foi aumentada e evita a fragmentação do pacote. Figura 7 mostra o formato de pacote Multi-LoRa com 16 bytes de cabeçalho e 240 bytes para carga útil. Os campos do cabeçalho do pacote são descritos a seguir:



**Figura 7:** Formato de pacote

- *Time to Live* (TTL) [1 byte]: significa o “tempo de vida” do pacote, que pode ser visto como o número de saltos permitidos antes que um nó elimine a mensagem.
- Tamanho [1 byte]: é todo o comprimento do pacote, ou seja, cabeçalho e carga útil em formação.
- Endereços de origem e destino [4 bytes]: significa os identificadores do nó que originou o pacote e o destino do pacote pretendido.
- Endereço do próximo salto [4 bytes]: é o identificador do próximo nó, que o pacote deve ser encaminhado, para chegar ao endereço de destino.
- Sequência [1 byte]: significa o contador global de mensagens para determinar a taxa de perda de pacotes e duplicados. Além disso, é usado para demultiplexar os fragmentos recebidos pelas duas interfaces de rádio, onde ambos os fragmentos devem ter a mesma sequência para ser agrupado.

- Tipo [1 byte]: é um caractere ASCII, que descreve a carga útil contendo:  $r$  significa mensagem de rota,  $h$  denota mensagem de olá,  $m$  significa dados mais significativos,  $l$  representa dados menos significativos.

O protocolo de roteamento Babel inclui as informações do próximo salto como um pacote carga útil, introduzindo processamento adicional no nó de retransmissão para obter tal informações vitais. Para lidar com esse problema, o endereço do próximo salto dentro do cabeçalho do pacote foi considerado. Cada nó tem um identificador único de 4 bytes com base nos bytes menos significativos do endereço MAC do hardware, que é usado para garantir este endereço individual. Foi utilizado esse identificador para manter a compatibilidade com o endereço MAC. Além disso, definiu-se o endereço de transmissão como 0xFFFFFFFF. É fundamental destacar que pode ter um maior tamanho do endereço do nó ao custo de reduzir o tamanho da carga útil. Assim que um nó se junta à rede pela primeira vez, ele precisa passar por quatro principais fases. A implementação dessas fases é discutida a seguir.

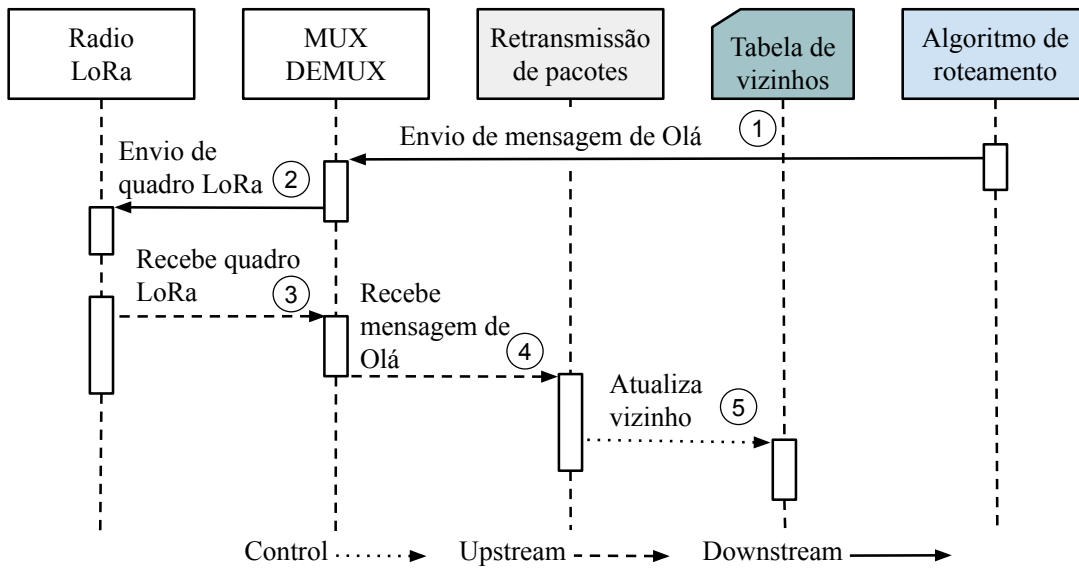
## 5.1 Implementação do protótipo

Nessa seção discute-se as fases de implementação da arquitetura Multi-LoRa nesse projeto, sendo elas: (i) Fase de descoberta, (ii) Fase de aprendizagem, (iii) Fase de encaminhamento, (iv) Fase de convergência.

### Fase de descoberta

A Figura 8 mostra o diagrama de sequência para a fase de descoberta, com uma numeração para cada sequência. Durante a fase de descoberta, o algoritmo de roteamento cria uma mensagem de "olá" (1) a cada intervalo de tempo para se apresentar ao seu vizinho, transmitido por um determinado rádio LoRa com baixa prioridade (2). A mensagem "olá" tem um tamanho de 16 bytes, que contém apenas as informações do cabeçalho como uma tupla (1, 16, *source address*, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF, *sequence number*,  $h$ ). Além disso, a mensagem de "olá" tem um TTL com o valor 1 para evitar inundações, o que significa que cada mensagem "olá" é transmitida apenas para vizinhos de um salto. Portanto, uma mensagem "olá" pode ser vista como um sinal de mensagem endereçada a todos os vizinhos usando o endereço de *broadcast*. Além disso, carrega o número de sequência da mensagem e as informações de prioridade do aplicativo para formar a tabela de vizinhos do nó.

Cada nó IoT descobre seus vizinhos ouvindo as mensagens de "olá" sendo transmitido pelos vizinhos do nó (3). A retransmissão de pacotes analisa o mensagem "olá" (4) e adiciona/atualiza as informações do vizinho na tabela de vizinhança (5). A tabela de vizinhos foi implementada como uma lista, com os seguintes recursos: endereço do nó, sucesso do pacote, métrica e prioridade, em que cada entrada tem 8 bytes. Finalmente, após um limite de tempo definido, todos os nós vizinhos já sabem sobre a existência de um novo nó, ou pelo menos um mínimo número



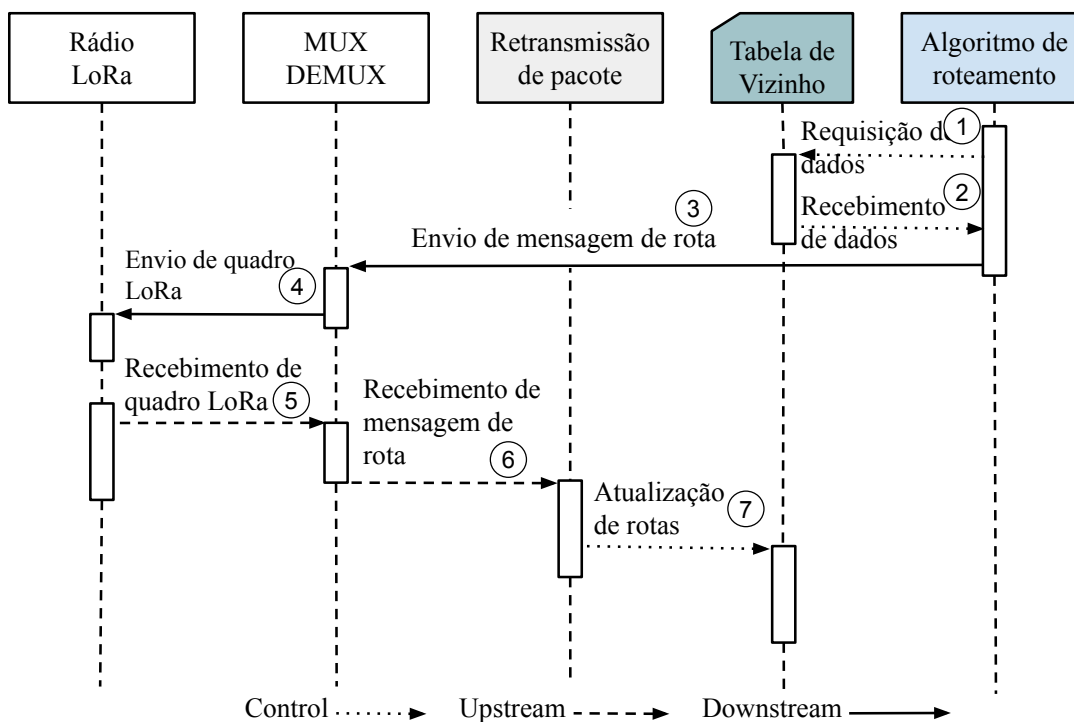
**Figura 8:** Diagrama de sequência para a fase de descoberta

de vizinhos descobertos, em seguida, o nó inicia a fase de aprendizagem.

## Fase de aprendizagem

A Figura 9 mostra o diagrama de sequência para a fase de aprendizagem, também enumerando cada sequência. Durante esta fase, o algoritmo de roteamento cria uma mensagem de roteamento (1) para compartilhar sua tabela de roteamento com seus vizinhos (2), transmitido por um determinado rádio LoRa com baixa prioridade (3). Especificamente, a mensagem de roteamento contém as informações do cabeçalho como uma tupla  $(1, s, source\ address, 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFFFF, sequence\ number, r)$ , e o roteamento da tabela como os dados de carga útil. Nesse sentido, a mensagem de roteamento tem um tamanho de byte (ou seja, cabeçalho e carga útil). No entanto, devido ao tamanho limitado do pacote (ou seja, 240 bytes de dados), a mensagem de roteamento é limitada a 30 rotas (ou seja, 8 bytes para cada rota). Portanto, um determinado nó IoT com mais de 30 rotas precisa enviar várias mensagens para compartilhar toda a sua tabela de roteamento criada pelo MUX/DEMUX (4-5).

O módulo de retransmissão de pacotes analisa a mensagem ouvindo um roteador proveniente de um determinado nó IoT (6). As informações da rota dentro da mensagem são comparadas com todas as rotas existentes na tabela de roteamento. Como resultado, a retransmissão do pacote adiciona a nova rota à sua tabela, atualiza a rota com uma nova ou melhor métrica, ou elimina a rota, pois tem uma melhor rota ou a rota refere-se ao endereço local dos nós (7). Portanto, cada nó IoT aprende sobre seus vizinhos e atinge um determinado nó dentro da rede. A tabela de roteamento também foi implementada como uma lista, com as seguintes informações: destino, próximo salto, distância, número de sequência, métrica e prioridade, em que cada entrada tem um tamanho de 8 bytes. A fase de aprendizagem nunca está completa, pois novos nós podem aparecer a qualquer momento. Após um determinado tempo configurado como



**Figura 9:** Diagrama de sequência para a fase de aprendizagem

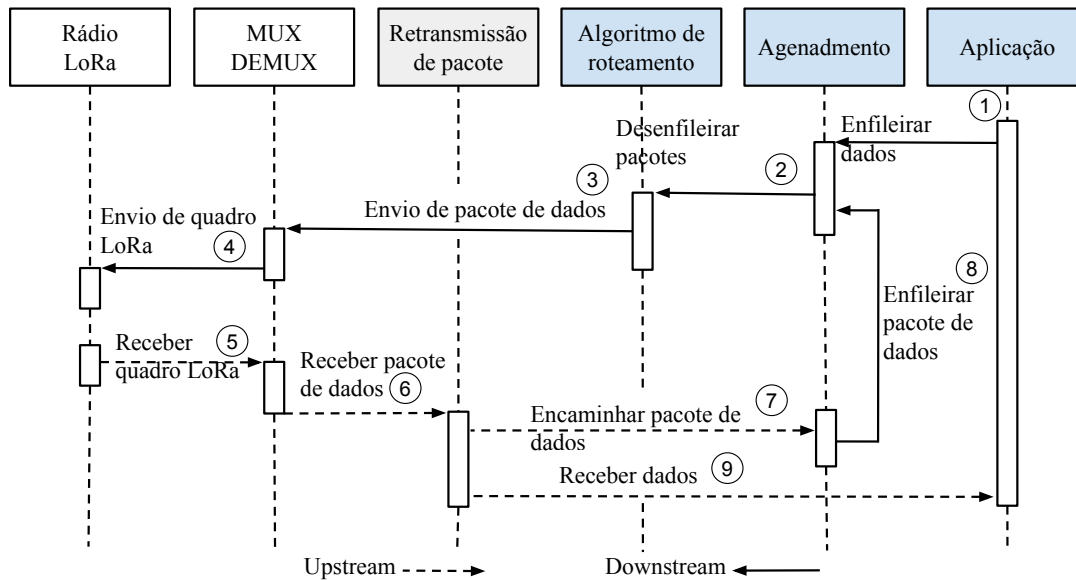
parâmetro em cada nó da rede, o nó entra na fase de encaminhamento.

### Fase de encaminhamento

A Figura 10 mostra o diagrama de sequência para a fase de encaminhamento. Nessa fase, o aplicativo coleta as informações e as envia para o agendamento para enviar a informação ao nó de destino (1). Sempre que um determinado nó IoT deseja enviar as informações coletadas para um determinado nó de destino, ele envia as informações dos dados para o agendamento. Portanto, o agendamento cria o pacote de dados e enfileira um pacote na fila correspondente com base na prioridade do aplicativo (2). O algoritmo de roteamento consome os pacotes da fila de prioridade com base no algoritmo *First In First Out*. Posteriormente, encapsula as informações necessárias para chegar à base de destino nas solicitações para a tabela de roteamento (3).

MUX/DEMUX fragmenta o pacote de dados em vários pacotes para transmitir em interfaces múltiplas (4-5). Além disso, MUX/DEMUX envia os dados para a retransmissão de pacotes (6), que analisa o endereço de destino dentro do cabeçalho do pacote, ou seja, um pacote de 128 bytes transmitido por uma interface de rádio é composto por 16 bytes de cabeçalho e 112 bytes de carga útil. Quando o pacote é transmitido por duas interfaces de rádio, é segmentado em dois pacotes. Neste caso, cada pacote contém 16 bytes de cabeçalho e a carga é igualmente particionada em 56 bytes. Posteriormente, a retransmissão de pacotes envia o pacote de dados para o aplicativo, assim que o pacote chega ao nó de destino (9). Caso contrário, ele envia o pacote de dados para o agendamento (7) para enfileirar um pacote na fila correspondente com

base na prioridade (8). O algoritmo continua até que o pacote chegue ao nó destino. Finalmente, um esquema de multiplexação de frequência foi considerado para o envio dos pacotes contendo dados do aplicativo, onde os dados são particionados entre as duas interfaces disponíveis para serem enviadas simultaneamente.



**Figura 10:** Diagrama de sequência para a fase de encaminhamento

## Fase de convergência

A fase de convergência é a integração das três primeiras fases. Essa convergência implica que cada nó está ciente de uma rota para todos os outros nós em uma rede. Nesse sentido, um nó da rede conhece o endereço de cada nó e o endereço do próximo salto para chegar ao endereço de destino, mas ele não conhece toda a topologia da rede. Esse conhecimento reduz a memória necessária para manter uma tabela de roteamento e o tempo necessário para a convergência. Portanto, não é necessário armazenar a rota completa para todos os nós, apenas as informações do nó vizinho para chegar ao nó final. Desta forma, as quatro fases projetadas são fundamentais para oferecer suporte a IoT em larga escala e garantir a eficiência da arquitetura Multi-LoRa.

## 5.2 Estimativa de custo do protótipo

É importante destacar que o protótipo foi projetado usando componentes eletrônicos de baixo custo. Para o desenvolvimento do protótipo proposto foi estimado valores de referência para aquisição dos itens apresentados na Tabela 3. O objetivo foi gerar valores relacionados aos investimentos necessários para aquisição do nós da rede Multi-LoRa. Pode-se utilizar um fator de multiplicação para escalar a rede testada com base nos parâmetros de nós por  $km^2$ , refletindo o custo para implantação conforme cenários estabelecidos de pequena e larga escala.



**Tabela 3:** Orçamento para um nó Multi-LoRa

Qtd.	Descrição	Justificativa	Valores (R\$)
1	Microcontrolador Espressif Esp32	Microcontrolador + rádio LoRa	194,11
2	Rádios LoRa SX1276	Múlti-rádio LoRa	399,80
1	Bateria lítio 3.7v 2100 mAh conector JST 1.25 mm	Alimentação do microcontrolador	15,99
<b>Total</b>			<b>609,90</b>

Os itens de referência para os valores orçados foram:

- Microcontrolador Espressif Esp32<sup>1</sup>
- Rádios LoRa SX1276<sup>2</sup>
- Bateria lítio 3.7v 2100<sup>3</sup>

Os valores são referentes a consulta realizada em 01/06/2022. Optou-se por não adquirir os sensores de umidade e temperatura, pois os dados originados por eles serão usados em pesquisas futuras. Baseado no protótipo desenvolvido, uma avaliação de desempenho da arquitetura Multi-Lora é apresentada no próximo capítulo.

<sup>1</sup><https://www.encurtador.com.br/dnzM6>

<sup>2</sup><https://www.encurtador.com.br/kpyAD>

<sup>3</sup><https://www.encurtador.com.br/hmuyRmAh>



## 6 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO PARA AVALIAÇÃO

Este capítulo descreve os parâmetros usados no ambiente que foi utilizado para avaliar a arquitetura Multi-LoRa. Além disso, o capítulo apresenta as métricas de desempenho usadas como proposta de avaliar da arquitetura baseando-se em dois cenários. O primeiro em pequena escala física e a segunda em um ambiente de simulação, onde a escalabilidade da arquitetura Multi-LoRa é investigada.

### 6.1 Métricas de avaliação

Duas métricas foram definidas para avaliar o desempenho em cada configuração, ou seja, *Packet Loss Ratio* (PLR) e *Average Packet Delay* (APD).  $PLR \in [0, 100]$  é uma maneira eficaz de analisar a implantação da rede como um todo. PLR deve estar mais próximo de 0 para implantação de rede ideal, ou seja, o número mínimo de colisões e perdas. PLR foi calculado como a razão entre o número de pacotes perdidos com o número total de pacotes enviados. APD corresponde a proporção entre a soma de Atrasos de Pacotes (PD) que foram recebidos com sucesso sobre o número de pacotes totais recebidos ( $TP_{Rx}$ ), conforme mostrado na Equação 6.1. PD significa transmitir um pacote da fonte ao seu destino, adicionando a propagação e o tempo de espera.

$$APD = \frac{\sum_{u=1}^U PD_u}{TP_{Rx}} \quad (6.1)$$

Foram enviados 1000 pacotes para cada experimento, conforme indicado na Tabela 4, repetindo os experimentos 33 vezes. Essas repetições apresentadas estatisticamente valores significativos, pois foi atingido um nível de confiança de 95% na medição de todos os testes realizados. O módulo de funções estatísticas (`scipy.stats`)<sup>1</sup> foi utilizado para calcular o nível de confiança para esta análise. Nos testes, os resultados mostram um comportamento consistente tanto na simulação quanto nos testes de hardware. Por fim, nas subseções seguintes os resultados do protótipo Multi-LoRa foram discutidos, considerando os experimentos em pequena escala (testado) e em grande escala (simulação).

### Abordagens de avaliação

Para investigar o desempenho da arquitetura Multi-LoRa foi definida duas abordagens em cenários de avaliação:

1. Em pequena escala com base em teste físico. Os resultados destes testes foram investigados para calibrar os experimentos de simulação e para analisar o desempenho do Multi-LoRa em experimentos reais.

---

<sup>1</sup><https://docs.scipy.org/doc/scipy/>

2. Experimentos de simulação foram realizados para avaliar a arquitetura Multi-LoRa em relação ao atraso e entrega de dados em um cenário de grande escala.

É necessário destacar que a simulação utilizou o mesmo código-fonte prototipado nos testes em pequena escala e estão disponíveis no GitHub<sup>2</sup>.

No ambiente de simulação, os pacotes de roteamento são capturados por uma interface de rede virtual na camada MAC e redirecionados para o modelo de simulação, que segue a metodologia de virtual mesh (MORAES et al., 2021). O modelo de simulação calcula a resposta da rede de acordo com a topologia da rede virtual e a posição atual dos nós virtuais. A simulação ocorre apenas no meio físico, enquanto todas as outras camadas permanecem inalteradas e funcionam de acordo com a implementação real do hardware. O tempo de propagação de cada pacote foi definido com base no *datasheet* 2 do SX1276. Nesse sentido, é possível determinar a colisão de pacotes analisando o *timestamp* de cada pacote em um determinado nó receptor. Dessa forma, pacotes com *timestamp* sobrepostos em um dado nó são considerados colisões e conseqüentemente descartados.

## 6.2 Cenários de testes

Um cenário de simulação foi projetado para avaliar o protótipo Multi-LoRa em grande escala. Por exemplo, é possível definir de 10 a 200 nós de IoT, considerando um tamanho de campo de 40 × 80 km. Especificamente, os nós IoT foram organizados em uma topologia de grade, ou seja, 2×5, 10×5, 10×10, e 10×20 para 10, 50, 100, e 200 nós respectivamente, com uma distância de 4 km entre cada nó IoT e o gateway no centro dessa topologia. Com base nessa topologia e nos protocolos de roteamento, cada pacote transmitiu em 1 a 6 saltos. Além disso, cada pacote teve 128 bytes, ou seja, um tamanho de pacote médio e usado em cenários de aplicação reais (TRAN et al., 2020). Por fim, é fundamental destacar que a simulação é fundamental para avaliar a escalabilidade de Multi-LoRa, devido a quantidade de nós reais de IoT disponíveis. Portanto, a pilha de protocolo Multi-LoRa foi implementada, onde os resultados da simulação têm um comportamento semelhante em comparação com a plataforma de teste e resultados, como no trabalho de Prade et al. (PRADE et al., 2020).

**Tabela 4:** Parâmetros de avaliação para a arquitetura Multi-LoRa

Características	Pequena escala	Larga escala
Número de nó	8	10-200
Tamanho do campo	8 x 12 (m)	40 x 80 (km)
Topologia	4 m	4 km
Tamanho do pacote (bytes)	32, 64, 128, 256	128
Número de pacotes		1000
Configurações Multi-LoRa	Configuração 1 (um rádio com SF7 / 125 KHz) Configuração 2 (dois rádios com SF7 / 125 KHz) Configuração 3 (três rádios com SF7 / 250 KHz)	

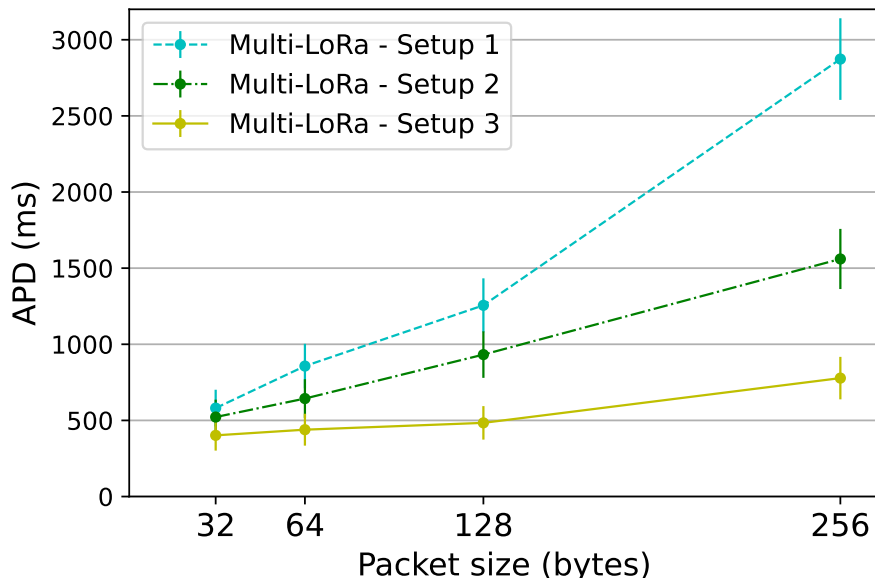
<sup>2</sup><https://github.com/luciorp/multi-lora>

Os parâmetros foram configurados de forma semelhantes para algumas características essenciais para a pequena escala (teste) e grande escala (simulação). Por exemplo, cada nó IoT envia um pacote de dados para o gateway LoRa e espera por um aviso de reconhecimento para enviar outro pacote de dados. No final, cada nó IoT enviou 1000 pacotes de dados, uma vez que o objetivo foi avaliar os dados entregues em um cenário de congestionado. A Tabela 4 resume os principais parâmetros experimentais que foram utilizados na avaliação de desempenho. Nos experimentos foram considerados três configurações: (i) *Multi-LoRa - Setup 1*, (ii) *Multi-LoRa - Setup 2*, and (iii) *Multi-LoRa - Setup 3*. Especificamente, *Multi-LoRa - Setup 1* representa uma arquitetura *multi-hop* com um rádio LoRa configurado com fator de propagação (SF) 7 e largura de banda (BW) 125 kHz, semelhante ao trabalho apresentado por Diop e Pham (MAMOUR; CONGDUC, 2019). *Multi-LoRa - Setup 2* representa uma arquitetura *multi-hop* com dois rádios LoRa configurados com SF 7 e BW 125 kHz, onde os valores SF e BW são escolhidos com base em Diop e Pham (MAMOUR; CONGDUC, 2019). Finalmente, *Multi-LoRa - Setup 3* apresenta uma arquitetura com dois rádios LoRa configurados com SF 7 e BW 250 kHz. Os valores de BW foram alterados para avaliar seu impacto, uma vez que um valor de BW mais alto deve apresentar condições para alcançar uma taxa de transferência de dados maior. Além disso, um tempo baixo de ToA fornece um alcance de rádio mais curto e maior sensibilidade a ruído (DANTAS et al., 2021).

### 6.3 Análise em pequena escala

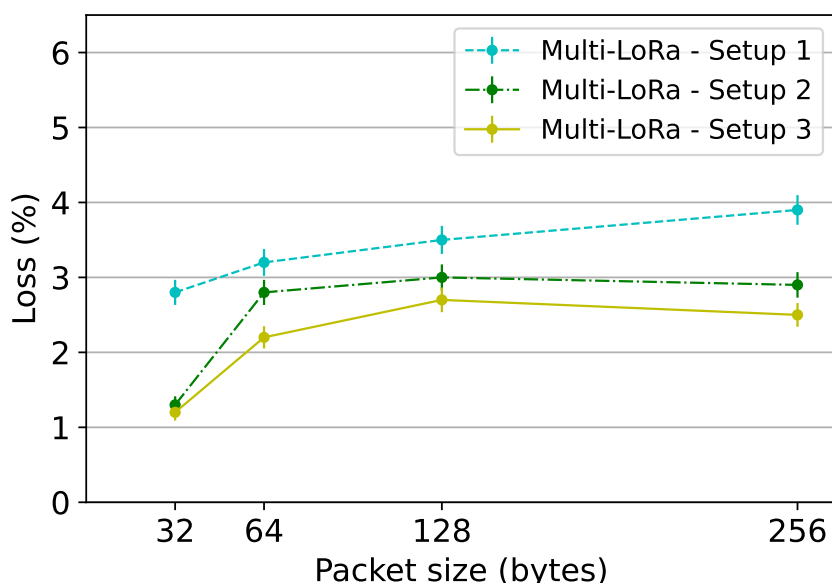
A Figura 11 mostra o atraso para a transmissão de pacotes com tamanhos diferentes considerando três configurações Multi-LoRa no ambiente de teste. Os resultados de atraso mostram que o APD aumenta assim que o tamanho do pacote aumenta para transmitir dados sobre a configuração 1. O fraco desempenho da arquitetura de rádio único deve-se à natureza *half-duplex* do rádio LoRa, onde o tempo de fila em cada salto é maior. Por exemplo, pacotes com 256 bytes têm APD 495% maior que o tamanho do pacote de 32 bytes transmitindo o pacote pela configuração 2. Cada pacote de dados foi dividido em dois pequenos pacotes para transmitir por cada rádio na configuração 2 e configuração 3, reduzindo o tempo de transmissão. Por fim, é possível concluir que a configuração 3 oferece menor APD independente do tamanho do pacote em relação às demais arquiteturas. Essa configuração considera a transmissão de pacotes em vários rádios para mitigar a natureza *half-duplex* do rádio LoRa e o valor BW de 250 kHz permite reduzir o APD.

A Figura 12 mostra a perda de pacotes pela transmissão de pacotes com tamanhos diferentes, considerando as três configurações Multi-LoRa definidas no ambiente de teste. Analisando os resultados, é possível concluir que a perda de pacotes aumenta em cerca de 2,1% assim que o tamanho do pacote aumenta para transmissão de pacotes de dados na configuração 1. No entanto, na configuração 2 e configuração 3 de Multi-LoRa aumentar a perda de pacotes em cerca de 1.3% para o envio de pacotes com o tamanho de 64 bytes em comparação com o



**Figura 11:** APD por diferente tamanho de pacote

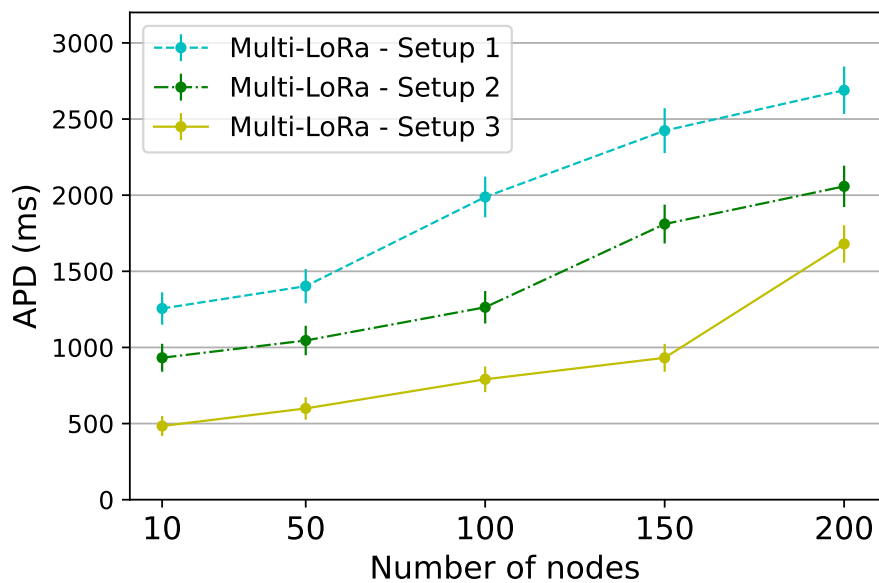
tamanho de 32 bytes. Finalmente, a configuração 3 tem uma perda de pacote de 1.1% e 0.8% menor do que a configuração 1 e a configuração 2 para tamanhos de pacote que variam de 64 a 256. Este desempenho da configuração 3 refere-se as características de multi-rádios comparadas a configuração 1, bem como os valores SF e BW, comparados para a configuração 2, que reduz a probabilidade de colisão em um cenário de vários saltos.



**Figura 12:** Perda por diferente tamanho de pacote

## 6.4 Análise em larga escala

A Figura 14 apresenta a métrica APD para vários nós IoT, considerando os três Multi-LoRa Setup no ambiente de simulação. Os resultados do APD para cenário de grande escala mostram que a configuração 3 fornece APD 61.5% e 26% menor do que a configuração 1 e configuração 2. Este comportamento ocorre porque a configuração 3 considera a transmissão de multi-rádio com uma configuração melhor, ou seja, valores BW e SF. Por exemplo, o pacote com uma carga útil de 128 bytes transmitidos com SF 7 e BW de 125 kHz tem um valor ToA de 332,03 ms, enquanto SF 7 e BW de 250kHz tem um valor médio de ToA de 166,02 ms. Este resultado explica o motivo para o desempenho APD de Multi-LoRa - Setup 3 ser 50% melhor do que Setup 2. Finalmente, a configuração 2 fornece resultados de APD 75% melhores do que a configuração 1, pois a configuração 2, considera dois rádios LoRa para transmissão de dados, reduzindo os efeitos de natureza *half-duplex* do rádio LoRa.



**Figura 13:** APD por diferente número de nó

A Figura 14 mostra os resultados da métrica PLR, considerando a implantação de um número diferente de nós de IoT que transmitem pacotes em relação as três configurações Multi-LoRa no ambiente de simulação. Ao analisar os resultados de PLR em grande escala, pode-se concluir que o PLR aumenta assim que aumenta a quantidade de nós de IoT. Por exemplo, o PLR aumenta em cerca de 2.9% para a configuração 3, concedendo 10 nós de IoT em comparação com a implantação de 200 nós de IoT. Essa concessão é porque, quanto mais nós na rede, aumentam a probabilidade de colisões, especialmente em uma transmissão multi-hop. Em resumo, a configuração 3 fornece o PLR 1.02% e 5.5% comparado com configurações 1 e 2, respectivamente, apesar do número de nós de IoT. Este comportamento é devido à sua transmissão multi-rádio com uma melhor configuração de controle de rádio LoRa. Por exemplo, a

transmissão de pacotes com um valor maior de BW reduz o ToA, onde ToA alto utiliza o canal sem fio por mais tempo, aumentando a probabilidade de colisão (MORAES; et al., 2020).

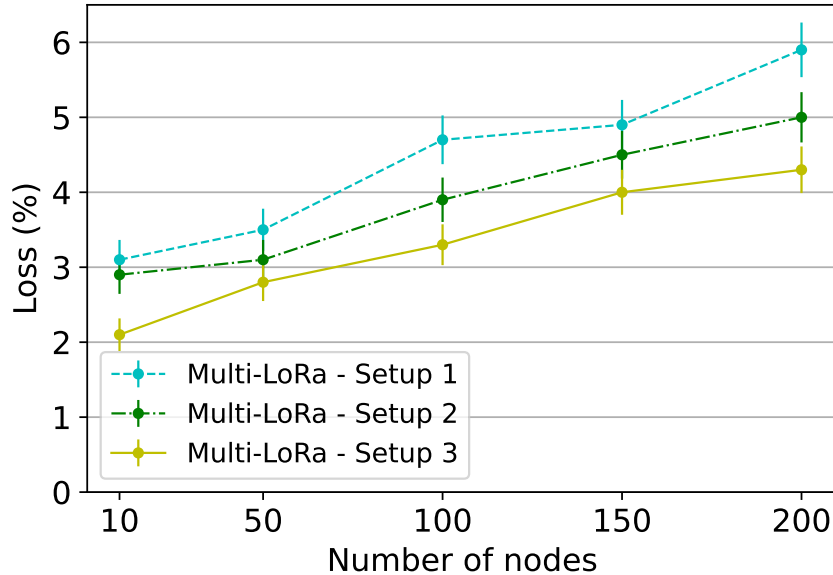


Figura 14: Perda por diferente número de nó

## 6.5 Análise dos resultados

Os experimentos de pequena escala (testado) e de grande escala (simulação) foram conduzidos considerando três configurações para avaliar o impacto das configurações multi-rádio e rádio LoRa diferentes. A análise de avaliação de desempenho identificou que a configuração 3 tem o melhor desempenho geral em comparação com configuração 1 e configuração 2 em cenários de teste e simulação. A configuração 3 considera uma arquitetura de comunicação LoRa multi-rádio e multi-hop com uma melhor configuração de rádio LoRa. A característica multi-hop aumenta a área de cobertura para uma implantação de IoT em larga escala, enquanto o multi-rádio atenua a natureza *half-duplex* do rádio LoRa. No entanto, a configuração 2 tem um desempenho de APD e PLR regular, associado a características multi-rádio, sem uma configuração de rádio LoRa exemplar. A configuração 2 tem resultados limitados correlacionados com fatores com apenas um rádio, sem uma configuração típica de rádio LoRa.



## 7 CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado apresentou uma arquitetura de comunicação LoRa multi-rádio e multi-hop, para aprimorar a cobertura e o serviço para implantação de IoT em grande escala em áreas rurais. A arquitetura foi baseada em uma topologia de rede ad hoc para aumentar a área de cobertura. Além disso, foram definidos mecanismos de multiplexação de dados em vários rádios LoRa para aumentar o rendimento e diminuir as colisões. Além disso, foram projetados experimentos de pequena e grande escala, considerando três configurações para avaliar a influência das configurações de rádio multi-rádio e LoRa. Especificamente, reduziu o atraso em 60% e a perda de pacotes em 2.9% em comparação com diferentes configurações em um ambiente de teste físico de pequena escala e simulação em grande escala. Portanto, os resultados mostraram que a arquitetura Multi-LoRa mitiga efetivamente os desafios da comunicação multi-hop sobre LoRa para implantação de IoT em larga escala em áreas rurais para melhorar a conectividade. Por exemplo, a característica multi-hop melhora a área de cobertura para uma implantação de IoT em larga escala em áreas rurais. Ao mesmo tempo, o multi-rádio diminui a natureza *half-duplex* do rádio LoRa.

Trabalhos futuros estão sendo planejados para avaliar o desempenho com multiplexação em um número mais significativo de rádios e melhorias nos algoritmos de roteamento. Além disso, pretende-se analisar as implementações do protótipo considerando a redução do consumo de energia e o atendimento a áreas rurais remotas sem fontes de energia significativas. Além disso, planeja-se comparar o desempenho com outras arquiteturas LoRa multi-hop existentes. Finalmente, pretende-se desenvolver um sistema de detecção de falhas para garantir a confiabilidade da rede em um ambiente remoto, como grandes áreas rurais. Este sistema de falhas poderá ajudar a reduzir os custos operacionais para melhorar a eficiência da agricultura.



## REFERÊNCIAS

- ABOLHASAN, M.; WYSOCKI, T.; DUTKIEWICZ, E. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 1–22, 2004.
- ALLIANCE, L. White paper: a technical overview of lora and lorawan. **The LoRa Alliance: San Ramon, CA, USA**, [S.l.], p. 7–11, 2015.
- ANEDDA, M. et al. An energy-efficient solution for multi-hop communications in low power wide area networks. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BROADBAND MULTIMEDIA SYSTEMS AND BROADCASTING (BMSB), 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.
- AUGUSTIN, A.; YI, J.; CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. M. A study of LoRa: long range & low power networks for the internet of things. **Sensors**, [S.l.], v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.
- BABAEI, M.; SHARIFIAN, S. An Improved Spread Factor Assignment Method for Large-Scale LoRaWAN Deployments in IoT. In: IRANIAN CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING AND INTELLIGENT SYSTEMS (ICSPIS), 4., 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p. 183–187.
- BELLO, O.; ZEADALLY, S. Toward efficient smartification of the Internet of Things (IoT) services. **Future Generation Computer Systems**, [S.l.], v. 92, p. 663–673, 2019.
- CHROBOCZEK, J.; SCHINAZI, D. **The Babel Routing Protocol**. [S.l.]: RFC Editor, 2021. RFC. (8966).
- COTRIM, J. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. LoRaWAN Mesh Networks: a review and classification of multihop communication. **Sensors**, [S.l.], v. 20, n. 15, p. 4273, 2020.
- DANTAS, F. et al. A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations. **IEEE Access**, [S.l.], v. 9, p. 106079–106106, 2021.
- DAWALIBY, S. et al. Adaptive dynamic network slicing in LoRa networks. **Future generation computer systems**, [S.l.], v. 98, p. 697–707, 2019.
- DIAS, J.; GRILO, A. Multi-hop LoRaWAN uplink extension: specification and prototype implementation. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 945–959, 2020.
- DWIJAKSARA, M. H. et al. Multihop gateway-to-gateway communication protocol for LoRa networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 949–954.
- EBI, C. et al. Synchronous LoRa mesh network to monitor processes in underground infrastructure. **IEEE access**, [S.l.], p. 57663–57677, 2019.
- ERGEERTS, G.; NIKODEM, M.; SUBOTIC, D.; SURMACZ, T.; WOJCIECHOWSKI, B.; DE MEULENAERE, P.; WEYN, M. DASH7 alliance protocol in monitoring applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON P2P, PARALLEL, GRID, CLOUD AND INTERNET COMPUTING (3PGCIC), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p. 623–628.

Gambiroza, J. C. et al. Capacity in LoRaWAN Networks: challenges and opportunities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART AND SUSTAINABLE TECHNOLOGIES (SPLITECH), 4., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

GHASEMPOUR, A. Internet of things in smart grid: architecture, applications, services, key technologies, and challenges. **Inventions**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 22, 2019.

GONDCHAWAR, N.; KAWITKAR, R. IoT based smart agriculture. **International Journal of advanced research in Computer and Communication Engineering**, [S.l.], v. 5, n. 6, p. 838–842, 2016.

HAXHIBEQIRI, J.; DE POORTER, E.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. A survey of LoRaWAN for IoT: from technology to application. **Sensors**, [S.l.], v. 18, n. 11, p. 3995, 2018.

KIM, D. H. et al. Low-power, long-range, high-data transmission using Wi-Fi and LoRa. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IT CONVERGENCE AND SECURITY (ICITCS), 6., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3.

KIM, D.-Y.; KIM, S. Data transmission using k-means clustering in low power wide area networks with mobile edge cloud. **Wireless Personal Communications**, [S.l.], v. 105, n. 2, p. 567–581, 2019.

KULATUNGA, C. et al. Opportunistic wireless networking for smart dairy farming. **IT Professional**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 16–23, 2017.

LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of Large-Area IoT Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: design and evaluation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018.

Liao, C. et al. Multi-Hop LoRa Networks Enabled by Concurrent Transmission. **IEEE Access**, [S.l.], v. 5, p. 21430–21446, 2017.

LOGINOV, V. et al. Study of Fast Multi-hop ALOHA with Instant Forwarding. In: IEEE 29TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC 2018), 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

LUNDELL, D. et al. A routing protocol for LoRa mesh networks. In: IEEE 19TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON "A WORLD OF WIRELESS, MOBILE AND MULTIMEDIA NETWORKS" (WOWMOM), 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p. 14–19.

LYU, J.; YU, D.; FU, L. Achieving max-min throughput in LoRa networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (ICNC), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p. 471–476.

MAMOUR, D.; CONGDUC, P. Increased Flexibility in Long-range IoT deployments with Transparent and Light-weight 2-hop LoRa Approach. In: WIRELESS DAYS (WD), 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

MATNI, N. et al. Experimenting Long Range Wide Area Network in an e-Health Environment: discussion and future directions. In: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING (IWCMC), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p. 758–763.

- MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.
- MIKHAYLOV, K. et al. Multi-RAT LPWAN in smart cities: trial of lorawan and nb-iot integration. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), 2018. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- MOLLAH, M. B.; ZEADALLY, S.; AZAD, M. A. K. Emerging wireless technologies for Internet of Things applications: opportunities and challenges. **Encyclopedia of Wireless Networks**, [S.l.], p. 390–400, 2020.
- MORAES, J.; et al. An Efficient Heuristic LoRaWAN Adaptive Resource Allocation for IoT Applications. In: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS (ISCC), 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- MORAES, J.; OLIVEIRA, H.; ROSÁRIO, D.; CERQUEIRA, E. Viabilização de Alocação de Recursos em LoRaWAN. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação**, [S.l.], v. 19, n. 2, 2021.
- PASOLINI, G.; BURATTI, C.; FELTRIN, L.; ZABINI, F.; DE CASTRO, C.; VERDONE, R.; ANDRISANO, O. Smart city pilot projects using LoRa and IEEE802. 15.4 technologies. **Sensors**, [S.l.], v. 18, n. 4, p. 1118, 2018.
- PRADE, L. et al. LoRa mesh architecture for automation of rural electricity distribution networks. **Electronics Letters**, [S.l.], v. 56, n. 14, p. 739–741, 2020.
- QADIR, Q. M. et al. Low power wide area networks: a survey of enabling technologies, applications and interoperability needs. **IEEE Access**, [S.l.], v. 6, p. 77454–77473, 2018.
- QUERALTA, J. P. et al. Edge-AI in LoRa-based health monitoring: fall detection system with fog computing and lstm recurrent neural networks. In: TSP), 42., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 601–604.
- RAZA, U. et al. Low power wide area networks: an overview. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.
- SANCHEZ-IBORRA, R.; SANCHEZ-GOMEZ, J.; BALLESTA-VIÑAS, J.; CANO, M.-D.; SKARMETA, A. F. Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions. **Sensors**, [S.l.], v. 18, n. 3, p. 772, 2018.
- SCIULLO, L.; TROTTA, A.; DI FELICE, M. Design and performance evaluation of a LoRa-based mobile emergency management system (LOCATE). **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v. 96, p. 101993, 2020.
- SEMTECH. LoRa™ Modulation Basics AN1200. 22. , [S.l.], 2015.
- SISINNI, E. et al. LoRaWAN range extender for Industrial IoT. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [S.l.], v. 16, p. 5607–5616, 2019.
- TRAN, H. P. et al. A Two-Hop Real-Time LoRa Protocol for Industrial Monitoring and Control Systems. **IEEE Access**, [S.l.], p. 126239–126252, 2020.

VISCONTI, P.; FAZIO, R. de; VELÁZQUEZ, R.; DEL-VALLE-SOTO, C.; GIANNOCCARO, N. I. Development of sensors-based agri-food traceability system remotely managed by a software platform for optimized farm management. **Sensors**, [S.l.], v. 20, n. 13, p. 3632, 2020.

ZHOU, W.; TONG, Z.; DONG, Z. Y.; WANG, Y. LoRa-Hybrid: a lorawan based multihop solution for regional microgrid. In: IEEE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION SYSTEMS (ICCCS), 2019., 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 650–654.

ZORBAS, D. et al. Offline scheduling algorithms for time-slotted LoRa-based bulk data transmission. In: IEEE 5TH WORLD FORUM ON INTERNET OF THINGS (WF-IOT), 2019. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.