



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS
COORDENAÇÃO DE SISTEMAS EM TELECOMUNICAÇÕES
TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELCOMUNICAÇÕES**

ANDRÉ LUIZ GOMES DE MEDEIROS

**A TECNOLOGIA LORA NO CAMPO DAS TELECOMUNICAÇÕES, SEUS
BENEFÍCIOS, INOVAÇÕES E CARACTERÍSTICAS**

**MANAUS - AM
2022**

ANDRÉ LUIZ GOMES DE MEDEIROS

**A TECNOLOGIA LORA NO CAMPO DAS TELECOMUNICAÇÕES, SEUS
BENEFÍCIOS, INOVAÇÕES E CARACTERÍSTICAS**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, como requisito parcial, para obtenção do título de Bacharel em Tecnologia em Sistemas em Telecomunicações.

Orientador: Celso Souza Cordeiro

MANAUS - AM
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

| | |
|-------|---|
| M488t | <p>Medeiros, André Luiz Gomes de. A tecnologia LoRa no campo das telecomunicações, seus benefícios, inovações e características / André Luiz Gomes de Medeiros. — Manaus, 2023. 50f.: il. (color.).</p> <p>Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, <i>Campus</i> Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, 2023. Orientador: Prof.º Celso Souza Cordeiro, Esp.</p> <p>1. Internet of Things (IoT). 2. Long Range (LoRa). 3. Wide Area Network (WAN). 4. LoRaWAN. I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.</p> |
| | CDD 621.382 |

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734)

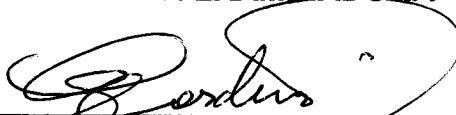
ANDRÉ LUIZ GOMES DE MEDEIROS

**A TECNOLOGIA LORA NO CAMPO DAS TELECOMUNICAÇÕES, SEUS
BENEFÍCIOS, INOVAÇÕES E CARACTERÍSTICAS**

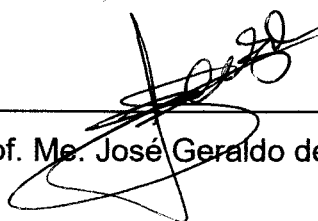
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito parcial para obtenção do Título Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Aprovado em 02 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Presidente/Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro.



1º Examinador: Prof. Me. José Geraldo de Pontes e Souza.



2º Examinador: Prof. Esp. Ewerton Andrey Godinho Ribeiro.

Manaus - AM

2023

Dedico aos meus pais, por todo o esforço feito para que eu pudesse galgar o caminho do conhecimento e que me presenteiam todos os dias com força e coragem.

E às minhas avós, Hebe Saldanha Guerreiro e Maria Hermelinda Pedrosa de Medeiros (in memoriam), que me deixaram grandes lembranças e que sempre se colocaram à disposição para compartilhar minhas dores, tristezas e alegrias.

AGRADECIMENTOS

A presente monografia não poderia chegar ao fim sem o precioso apoio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer a Deus, meu pai maior, que tanto tenho fé,

Quero agradecer à minha família, em especial aos meus pais, Waldir Pedrosa de Medeiros e Maria de Fátima Guerreiro Gomes, e aos meus amados filhos Diogo dos Santos de Medeiros e Gabriel dos Santos de Medeiros, pelo apoio incondicional que me deram, especialmente ao longo da elaboração deste trabalho que sempre me trouxeram alento às angústias e aflições, sempre me valorizando e mostrando o quão certo foi o caminho escolhido.

Ao meu orientador, Professor Celso Souza Cordeiro, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que me orientou neste trabalho e em todos aqueles que realizei durante a graduação. Muito obrigado por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas da graduação e amigos, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

Agradeço a todos do IFAM, que foram sempre prestativos e resolutivos em tudo que precisei.

Sem vocês este sonho não seria possível.

“Sempre que te perguntarem se podes
fazer um trabalho, responde que sim e te
ponhas em seguida a aprender como se
faz”
(F. Roosevelt)

RESUMO:

Com o aumento do número de dispositivos conectados à rede, cada vez mais a Internet das Coisas entra em foco. Tem-se aplicações que demandam alta ou baixa taxa de transmissão, grande ou pequena cobertura, ou a necessidade de existir pouca manutenção, para locais acesso dificultado, por exemplo. Há um leque de tecnologias bem difundidas que podem cobrir essas demandas, e neste estudo destacou-se a tecnologia LoRa no campo das telecomunicações. De tal modo, o objetivo geral desta monografia é: Apresentar a atuação da tecnologia LoRa no campo das telecomunicações, detalhando suas características, benefícios e inovações na área. Para tal, realizou-se uma revisão bibliográfica clara e concisa sobre o tema, baseada em achados da literatura. Foi possível demonstrar que os dispositivos LoRa revolucionaram a internet das coisas, possibilitando a comunicação de dados em um longo alcance, usando muito pouca energia. Quando conectados a uma rede LoRaWAN não celular, os dispositivos LoRa acomodam uma vasta gama de aplicativos IoT, transmitindo pacotes com informações importantes. As redes LoRaWAN preenchem a lacuna tecnológica das redes celulares e baseadas em Wi-Fi que ordenam alta largura de banda ou alta potência, ou têm alcance limitado ou incapacidade de penetrar em ambientes internos profundos. Constatou-se que a tecnologia LoRa permite o desenvolvimento de diversos projetos no setor em que a quantidade de dados a serem transmitidos pelos sensores nas bordas finais da estrutura não seja muito grande. Assim, em episódios em que vídeos, imagens pesadas e outras informações necessitem ser transmitidas até o Servidor da Aplicação, talvez o LoRa ainda não seja uma solução. Mas, em situações que informações mais sucintas (textos e medições, entre outros dados) são enviadas, as redes LoRa podem ser implementadas com bom desempenho, como destacou-se neste estudo o caso de gerenciamento inteligente da rede de água, conectividade no campo, detecção de desastres naturais e monitoramento ambiental assim como localização de bens.

Palavras-Chave: IoT. LoRa. LoRaWAN. WAN. LPWAN.

ABSTRACT:

With the increasing number of devices connected to the network, more and more the Internet of Things comes into focus. There are applications that demand high or low transmission rate, large or small coverage, or the need for little maintenance, for difficult access places, for example. There is a range of widespread technologies that can cover these demands, and this study highlighted LoRa technology in the field of telecommunications. In this way, the general objective of this monograph is: To present the performance of LoRa technology in the field of telecommunications, detailing its characteristics, benefits and innovations in the area. To this end, a clear and concise literature review on the subject was carried out, based on findings in the literature. It was possible to demonstrate that LoRa devices revolutionized the internet of things, enabling data communication over a long range, using very little energy. When connected to a non-cellular LoRaWAN network, LoRa devices accommodate a wide range of IoT applications, transmitting packets of important information. LoRaWAN networks bridge the technology gap for cellular and Wi-Fi-based networks that command high bandwidth or high power, or have limited range or inability to penetrate deep indoor environments. It was verified that the LoRa technology allows the development of several projects in the sector in which the amount of data to be transmitted by the sensors at the final edges of the structure is not very large. Thus, in episodes where videos, heavy images and other information need to be transmitted to the Application Server, perhaps LoRa is not yet a solution. However, in situations where more succinct information (texts and measurements, among other data) is sent, LoRa networks can be implemented with good performance, as highlighted in this study in the case of intelligent management of the water network, connectivity in the field, detection of natural disasters and environmental monitoring as well as location of assets.

Keywords: IoT. LoRa. LoRaWAN. WAN. LPWAN.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - Componentes básicos da IoT. | 17 |
| FIGURA 2 – Características técnicas da Tecnologia LoRa. | 22 |
| FIGURA 3 - Arquitetura da tecnologia de rede LoRa. | 23 |
| FIGURA 4 - Comparação entre tecnologias wireless. | 26 |
| FIGURA 5 - Comparação de pontos importantes em LPWAN. | 27 |
| FIGURA 6 - Topologia de rede LPWAN em estrela. | 28 |
| FIGURA 7 - Arquitetura do Protocolo LoRa. | 29 |
| FIGURA 8 - Arquitetura do protocolo LoRa/LoRaWAN e a encriptação utilizada..... | 30 |
| FIGURA 9 - Classes de Dispositivos para LoRaWAN..... | 32 |
| FIGURA 10 - Modo de operação Classe A. | 33 |
| FIGURA 11 - Modo de operação Classe B. | 34 |
| FIGURA 12 - Modo de operação Classe C. | 34 |
| FIGURA 13 - Procedimento de aceder a rede onde as chaves são negociadas, no modo de ativação | 36 |
| FIGURA 14 - CSS - Chirp Spread Spectrum..... | 37 |
| FIGURA 15 - Arquitetura da solução proposta por Saravanan e Iyer (2017) para o sistema de gerenciamento inteligente da rede de água. | 39 |
| FIGURA 16 – Equipamentos conectados à uma rede LoRa, no campo. | 41 |
| FIGURA 17 - Arquitetura da EstAcqua..... | 43 |
| FIGURA 18 - Arquitetura da IoTflood. | 44 |
| FIGURA 19 - Plataforma de Localização 3D..... | 45 |
| FIGURA 20 - Plataforma de Rastreamento..... | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - Propriedades e grandezas da tecnologia LPWAN..... | 27 |
| TABELA 2 - Principais características dos dispositivos LoRa. | 35 |

LISTA DE ABREVEAÇÕES, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABP - Activation By Personalization

ADR - Adaptative Data Rate

AES - Advanced Encryption Standard

ALOHA - Advocates of Linux Open-source Hawaii Association

AppSKey - Application Session Key

BW - Bandwidth

CRC - Cyclic Redudancy Check

CSS - Chirp Spread Spectrum

EF - Entidades Físicas

EV - Entidades Virtuais

EXI - Efficient XML Interchange

FEC - Forward Error Correction

FSK - Frequency Shift Keying

IoT - Internet das Coisas

ISM - Industrial Scientific and Medical

LPWAN - Low Power Wide Area Network

M2M - Machine-to-Machine

MAC - Medium Acess Control

NFC - Near Field Communication

NwkSKey - Network Session Key

OSI - Open System Interconnection

OTAA - Over The Air Activation

OWL - Web Ontology Language

RDF - Resource Description Framework

RFID - Radio-Frequency Identification

SF - Spreading Factor

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 INTERNET OF THINGS (IOT) | 16 |
| 3. COMUNICAÇÃO SEM FIO | 19 |
| 3.1 LORA..... | 19 |
| 3.1.1 Protocolo de comunicação LoRaWAN | 28 |
| 3.1.2 Funcionamento das redes LoRa | 36 |
| 3.1.3 Vantagens das redes LoRa..... | 37 |
| 3.2 IMPLEMENTAÇÕES DA REDE LORA | 38 |
| 3.2.1 Gerenciamento inteligente da rede de água..... | 38 |
| 3.2.2 Conectividade no campo | 39 |
| 3.2.3 Detecção de desastres naturais e monitoramento ambiental..... | 42 |
| 3.2.4 Localização de bens..... | 44 |
| 3.3 INOVAÇÕES NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES COM O USO DA TECNOLOGIA LORA | 47 |
| 4 CONCLUSÃO | 49 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 51 |

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o crescimento exponencial no quantitativo de dispositivos conectados à rede, em todo o mundo, também se viu um aumento expressivo no emprego de dispositivos de Internet das Coisas (IoT), abrindo possibilidade para novas aplicações (MADAKAM et al., 2015). Tem-se aplicações que demandam alta ou baixa taxa de transmissão, grande ou pequena cobertura, ou a necessidade de existir pouca manutenção, para locais acesso dificultado, por exemplo. Há um leque de tecnologias bem difundidas que podem cobrir essas demandas.

Esta alta vem seguida de progressos tecnológicos, que, por sua vez, são responsáveis pela miniaturização de componentes empregados em placas lógicas, o que admite reduzir o custo do hardware e ainda o consumo de energia dos dispositivos (SERAFIM, 2014).

Neste sentido, destaca-se uma nova categoria de tecnologias, denominada Low Power Wide Area Network (LPWAN), que abrange tecnologias sem fio de baixo consumo de energia e longo alcance. Bardyn et al. (2016) afirma que seus maiores obstáculos são as taxas de transmissão, que comumente não excedem a casa dos 100 kbps. Trata-se de tecnologias projetadas para conectar dispositivos que enviam pequenas quantidades de dados com um longo alcance, sem precisar de uma bateria com longa duração (AAZAM e HUH, 2014).

Na categoria de LPWAN, destaca-se a LoRa, delimitação deste estudo. Augustin et al. (2016) cita que a LoRa é muito semelhante as tecnologias wireless e Bluetooth, contudo, ao contrário dessas, ela possibilita a comunicação por meio de uma rede sem fio de longo alcance. Trata-se de uma derivação da tecnologia de espalhamento espectral, Chirp Spread Spectrum (CSS), sendo propriedade da Semtech, abrange apenas a camada física. Assim, há a possibilidade do desenvolvimento de várias pilhas de protocolos que empregam a tecnologia LoRa.

Segundo Cossini (2016), dentre as redes já desenvolvidas, a LoRaWAN chama bastante atenção, sendo assinalada por ser uma pilha de protocolos aberta, assim, pode-se achar várias implementações livres do seu funcionamento, assim como a implementação deles com dispositivos de baixo custo disponíveis no mercado.

Neste contexto, o problema científico deste estudo busca saber: Qual a atuação da tecnologia LoRa no campo das telecomunicações?

E como resposta ao problema científico levantado, destaca-se que: a principal vantagem dos dispositivos LoRa comparadas a outras tecnologias semelhantes, é a possibilidade de alcançar grandes distâncias, na faixa de quilômetros, empregando um consumo de energia muito baixo. Em vista destas propriedades, a flexibilidade no uso prático em vários cenários se torna mais umas das vantagens da tecnologia LoRa, que possibilita seu uso em várias áreas como: na agricultura, para monitoramento das condições do ambiente; em áreas hospitalares, para monitoramento de pacientes e infraestrutura; conectividade em casas inteligentes, pela capacidade de ultrapassar obstruções, como paredes, e de suportar aplicativos alimentados por bateria e com baixo consumo de dados, que podem ser usados em casas inteligentes; ou ainda na área de logística, como rastreamento de baixo custo.

Sabendo-se que o estudo das redes de comunicação em rádio frequência LPWAN tem chamado grande atenção com o surgimento da quarta revolução industrial e o 5G, colaborando na automatização e monitoramento remoto industrial, na produção agrícola, no setor militar e na sociedade em geral, este estudo justifica-se por apresentar novas tecnologias que possam cooperar para que o Brasil alcance um patamar de destaque dentre os países de maior projeção no cenário mundial.

Por conta de a camada física LoRa ser patenteada e fechada, tendo uma rede aberta e com boa documentação, os estudos de redes LoRaWAN tornam-se economicamente mais viáveis que em outras redes LPWAN, em que seria preciso o pagamento de licenças por dispositivos. Desta forma, esta monografia tem sua importância por estudar os benefícios, inovações e características da rede LoRa, no Brasil, por ser uma nova tecnologia de rede de comunicação direcionada à internet das coisas e com aplicação para longos alcances, com a finalidade de reduzir o consumo energético dos dispositivos periféricos, aprimorar a qualidade dos dados, elevar a escalabilidade, elevar o monitoramento de dados e garantir segurança na rede de comunicação aplicada no Brasil.

De tal modo, esta monografia tem como objetivo geral: Apresentar a atuação da tecnologia LoRa no campo das telecomunicações, detalhando suas características, benefícios e inovações na área, a partir de uma revisão bibliográfica clara e concisa sobre o tema.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Compreender a rede LoRa® e seu protocolo LoRaWAN®, bem como suas características técnicas;

- Entender o funcionamento de uma rede LoRa;
- Expor os benefícios da implantação de uma rede LoRaWAN;
- Identificar as inovações na área de telecomunicações com o uso da tecnologia LoRa.

2 INTERNET OF THINGS (IOT)

A Internet das Coisas (IoT), do inglês Internet of Things, surgiu dos progressos de diversas áreas como sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. Contudo, a IoT tem ganhado grande destaque não apenas na academia mas também na indústria, por conta do seu potencial de utilização nas mais variadas áreas das ações humanas (MAGRANI, 2018).

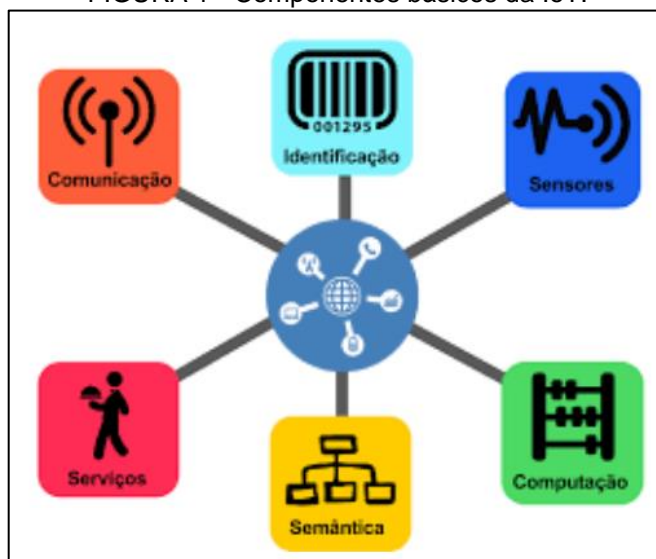
Para Pires et al. (2015), a “internet das coisas” apareceu há pouco tempo, como uma nova definição de “rede”, que compreende comunicações e processamento dos mais variados equipamentos. O vocábulo “internet”, com o grande poder que tem para toda a população do planeta, veio para agregar a nova expressão “internet das coisas”, e, de tal modo, oferecer a ela alcance, inclusão imediata de magnitude, tecnologia e perspectivas futuramente.

Trata-se de um novo ponto de vista para a internet, em que se abarca não apenas computadores, como, ainda, objetos do cotidiano (FACCIONI FILHO, 2016). Não é exatamente uma nova tecnologia, mas uma nova fronteira em que a internet está se inserindo, decorrência do progresso tecnológico que vem acontecendo ininterruptamente, sobretudo na miniaturização eletrônica e dos protocolos variados de comunicação (HINER, 2013).

Conforme Vermesan e Friess (2014), a Internet das Coisas é, de forma clara, uma extensão da Internet atual, que oferece aos objetos do cotidiano, com capacidade computacional e de comunicação, se conectarem à Internet. A conexão com a rede mundial de computadores controla remotamente os objetos e possibilita que os próprios objetos sejam acessados como provedores de serviços. Faccioni Filho (2016) afirma que estas novas habilidades, dos objetos comuns, acendem um grande quantitativo de oportunidades tanto no campo acadêmico quanto no industrial.

Desta forma, a Internet das Coisas apresenta uma revolução tecnológica com o intuito de aperfeiçoar, otimizar processos e atividades, por meio da conectividade e compartilhamento de recursos entre objetos ou “coisas”. Magrani (2018) afirma que seus componentes básicos são divididos em: sensores, identificação, comunicação, semântica, computação e serviços, como é visto na FIGURA 1, a seguir.

FIGURA 1 - Componentes básicos da IoT.



Fonte: SANTOS et al (2016).

A partir da Figura 1 exposta, que exhibe os blocos básicos de construção da IoT, verifica-se que a IoT representa a combinação de várias tecnologias, que se complementam com o intuito de facilitar a integração dos objetos no ambiente físico ao mundo virtual.

Identificação é um dos componentes mais importantes, já que é fundamental identificar os objetos exclusivamente para conectá-los à Internet. As tecnologias que podem ser utilizadas para isso são: Identificação por Radio Frequência do inglês Radio-Frequency Identification (RFID), Comunicação de Campo Próximo do inglês Near Field Communication (NFC) e endereçamento IP (HINER, 2013).

Sensores coletam informações a respeito do panorama onde os objetos estão, e na sequência, armazenam ou encaminham essas informações para data warehouse, clouds ou centros de armazenamento. E nesta etapa, tem-se ainda os atuadores que podem manipular o ambiente ou reagir conforme as informações lidas (MAGRANI, 2018).

Comunicação está relacionada às várias técnicas empregadas para conectar objetos inteligentes, cumprindo função importante no consumo de energia dos objetos sendo, assim, um fator crítico. Algumas das tecnologias comuns para a comunicação são WiFi, Bluetooth, IEEE 802.15.4 e RFID (SANTOS et al., 2016).

O bloco de Computação abrange a unidade de processamento como, por exemplo, microcontroladores, processadores e FPGAs, com a função de executar algoritmos locais nos objetos inteligentes (SANTOS et al., 2016).

No bloco Serviços, destaca-se que a IoT pode abastecer várias classes de serviços, dentre elas, ressaltam-se os Serviços de Identificação, com a função de mapear Entidades Físicas (EF) (de interesse do usuário) em Entidades Virtuais (EV) (HINER, 2013).

Os Serviços de Agregação de Dados coletam e organizam dados homogêneos e heterogêneos adquiridos dos objetos inteligentes; Serviços de Colaboração e Inteligência atuam sobre os serviços de agregação de dados para tomar decisões e reagir de forma apropriada a um apontado cenário; e Serviços de Ubiquidade buscam abastecer serviços de cooperação e inteligência em qualquer momento e qualquer lugar em que seja preciso (SANTOS et al., 2016).

A Semântica está relacionada à habilidade de extração de conhecimento dos objetos na IoT, sendo a descoberta de conhecimento e utilização eficiente dos recursos presentes na IoT, com os dados já existentes, com a finalidade de fornecer algum serviço. Para isso, podem ser empregadas várias técnicas como: Resource Description Framework (RDF), Web Ontology Language (OWL) e Efficient XML Interchange (EXI).

Para Santaella et al. (2013), os objetos inteligentes têm função essencial no progresso tecnológico citado. Isto porque os objetos têm capacidade de comunicação e processamento juntamente com sensores, que transformam o emprego destes objetos.

Hoje em dia, não apenas computadores tradicionais estão conectados à grande rede, mas ainda uma grande heterogeneidade de aparelhos tais como TVs, Laptops, automóveis, smartphones, consoles de jogos, webcams e a lista se expande a cada dia. Neste novo contexto, a pluralidade só aumenta e as previsões sugerem que mais de 40 bilhões de dispositivos estarão conectados até 2020 (FORBES, 2014).

Empregando os recursos desses objetos, é possível controlá-los, facilitar troca de informações uns com os outros, acessar serviços da Internet e interagir com pessoas. Simultaneamente, as novas possibilidades de aplicações que surgem são vastas (como cidades inteligentes (Smart Cities), saúde (Healthcare), casas inteligentes (Smart Home) e, assim, os desafios surgem (regulamentações, segurança, padronizações) (PIRES et al., 2015).

Vale destacar que um dos elementos decisivos para o sucesso da IoT está na padronização das tecnologias. Pois isto permite que a heterogeneidade de

dispositivos conectados à Internet aumente, fazendo com que a IoT seja uma realidade.

3. COMUNICAÇÃO SEM FIO

Com as transformações do controle com fios das redes industriais para o uso de redes sem fio, apareceu a necessidade da concepção de protocolos de comunicação que fossem seguros contra tentativas de coleta de informações por pessoas não permitidas, robustos para se atuar em ambientes com interferência eletromagnética e de baixa potência para que se alcançasse maior vida útil da bateria dos equipamentos e menor manutenção (ROCHOL, 2018).

Nesta seção será abordada a Tecnologia LoRa que é um exemplo de comunicação sem fio e delimitação deste estudo.

3.1 LORA

A tecnologia LoRa (abreviação de *Long Range* – longo alcance, em inglês), é uma nova forma de comunicação sem fio, que apareceu no panorama da Internet das Coisas (IoT), como uma das soluções para atender esse mercado tão cheio de oportunidades, como é visto na Figura 1. Apesar do tipo de conexão ser semelhante ao Wi-Fi e Bluetooth, a LoRa possibilita comunicações em longas distâncias com reduzido gasto de energia, alcançando 3 a 4 km em áreas urbanas e até 15 km em áreas rurais (BARDYN et al., 2016).

LoRa é um tipo de modulação para transmissão de dados que compõe a camada física da tecnologia de comunicação sem fio. Desenvolveu-se por ser empregada em comunicações de baixa taxa de transferência de dados, reduzido consumo de energia e longas distâncias (ZYRIANOFF et al., 2019).

As redes Low Power Wide Area Network (LPWAN) são tecnologias relativamente recentes no mercado e são conhecidas sobretudo pelo seu longo alcance e reduzido consumo de energia (BARDYN et al., 2016). Esta tecnologia, geralmente, é empregada em aplicações que precisam se comunicar por meio de quilômetros de distância com taxas de transferência variantes de 10 bps até alguns kbps, ou também conectar objetos que na maioria das vezes não têm outra solução de conectividade (KAGEYAMA e MENEZES, 2019).

De acordo com Dias (2016), o protocolo LPWAN é muito atrativo para uso em atuações IoT, possuindo mais direção em aplicações emergentes, em que as propriedades de potência e baixa largura de banda das aplicações ordenam uma pequena mobilidade e uma reduzida taxa de transferência de dados.

Para Hoang et al. (2020), o LoRa oferece uma transmissão a longas distâncias, com reduzido consumo energético, segura e baixa taxa de transmissão de dados. Pode ainda ser integrado às redes existentes, possibilitando a implementação de soluções IOT e da Indústria 4.0, atuando por baterias a um baixo custo.

Neste contexto, destaca-se a LoRa que é um tipo de rede sem fio LPWAN que emprega ondas de rádio frequência para transmitir reduzidas taxas de dados por longas distâncias. Trata-se de uma camada que permite fazer a comunicação entre os dispositivos da rede (KLAUCK, 2019).

Segundo Georgiou e Raza (2017), LoRa é uma tecnologia proposta e desenvolvida pela empresa Semtech Corporation, baseada no Chirp Spread Spectrum. A tecnologia Lora foi recentemente promovida pela empresa LoRa Alliance, que ainda determinou as camadas mais elevadas e a arquitetura de rede a respeito das camadas físicas da tecnologia LoRa, chamadas de LoRaWAN. Para Werner (2018), LoRa Alliance é uma organização sem fins lucrativos composta e gerida por empresas do mercado da tecnologia que possuem a finalidade de padronizar a rede LoRa.

Georgiou e Raza (2017) afirmam que CSS é uma modulação que emprega um método de espalhamento de frequência como técnica de modulação. Os denominados pulsos de *chirp* são enviados como símbolos, que aumentam ou reduzem na frequência LoRa consecutivamente ao longo do tempo. A transmissão de dados é assim feita pela sequência sequencial desses pulsos chirp.

Assim, Abel (2019) destaca que a modulação por espalhamento espectral LoRa emprega o CSS para codificar os dados a serem transmitidos. Cada bit é espalhado por um fator de *chirping*, onde sua frequência é elevada ou reduzida com o tempo. Pequenos fatores de espalhamento aumentam a taxa de transmissão de dados, ao passo que, altos fatores aumentam a robustez do sinal.

Abel (2019) ressalta que a modulação LoRa é mais resistente a ruídos de fundo. Pois, ao invés de empregar somente as duas frequências de uma transmissão *Frequency Shift Key (FSK)*¹, ela varre todas as frequências presentes entre elas.

Estes fatores atribuem à modulação LoRa características como: elevada robustez, resistência a diversos caminhos, resistência a *Doppler*, grande alcance, localização, entre outros. Sendo que as propriedades de reduzido consumo, reduzido custo, longo alcance e robustez do sinal, fazem com que o protocolo LoRa seja benéfico em distantes aplicações. Entre elas: telemetria e controle energético, controle de rebanhos de gado, segurança residencial, monitoramento de nível de caixas d'água, gerenciamento de vazamentos de gás, controle de temperatura, e outros (ERIDANI et al., 2019; WILDAN et al., 2020).

A rede LoRa, na maioria das vezes, é constituída por uma topologia que emprega poucos equipamentos, sendo um deles, o dispositivo LoRa que tem a função de receber os dados oriundos de um ou mais sensores IoT e enviá-los para o gateway que também tem tecnologia LoRa (COSSINI, 2016).

Este gateway, por sua vez, envia os dados para os servidores de rede, que fazem o tratamento dos dados e retornam uma resposta se existir necessidade (COSSINI, 2016).

Eridani et al. (2019) cita que um dos grandes custos relacionados à efetivação de redes sem fio é o módulo central/Gateway, já que este na maioria das vezes agrupa todo o processamento e gerenciamento dos dados adquiridos no sistema. Por conta do seu longo alcance, um Gateway pode cobrir uma grande área. Assim, necessita-se de menos Gateways para administrar uma rede que está distribuída em uma área extensa.

O LoRa atua em frequências que não precisam de licenças para agir, abaixo de 1GHz, como 433MHz, 868MHz, 915MHz e 923MHz. O LoRa oferece uma grande cobertura, até em ambientes fechados, elevada vida útil de bateria e reduzido custo. Estas propriedades fazem da tecnologia LoRa, uma extraordinária escolha ao se utilizar soluções IOT e para a indústria 4.0, desde que não exista a precisão de um elevado fluxo de dados ou comunicação em tempo real (AUGUSTIN et al., 2016).

Na

FIGURA 2, a seguir, verifica-se um agrupado de características técnicas da Tecnologia LoRa.

¹ Modulação por chaveamento de frequência.

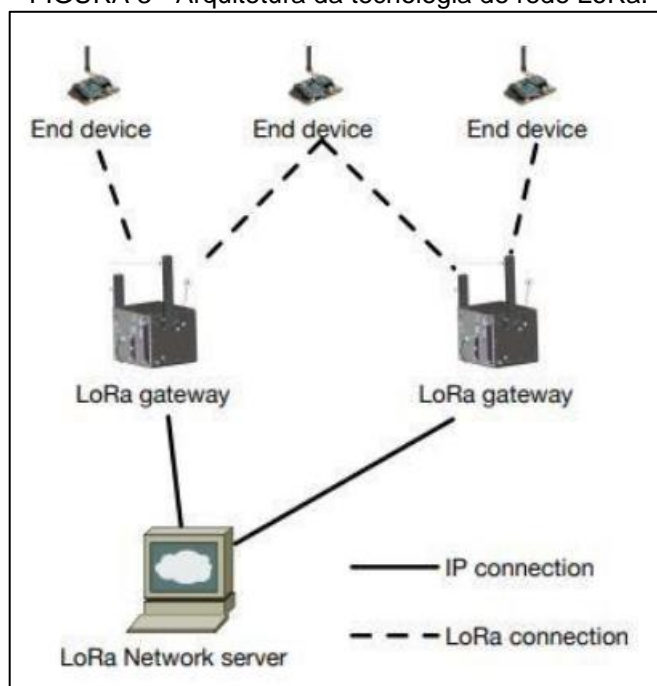
FIGURA 2 – Características técnicas da Tecnologia LoRa.



Fonte: Sornin (Semtech) et al., 2016.

Na sequência, pode-se visualizar, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a topologia em estrela desta tecnologia.

FIGURA 3 - Arquitetura da tecnologia de rede LoRa.



Fonte: AUGUSTIN et al. (2016)

Segundo Augustin et al. (2016), a arquitetura básica da rede LoRaWAN, abrange:

a) Módulos (ou *End nodes*, ou *End device*): sensores, alarmes, equipamentos e monitores que registram dados, são dispositivos interligados a baterias que geralmente ficam localizados na ponta do sistema, ou seja, onde os dados são colhidos;

b) *Gateways*: dispositivos que exercem função de intermediários entre os módulos e os Servidores de Rede, e geralmente, são os dispositivos que estão interligados à rede;

c) Servidor de Rede: dispositivo que desenvolve a lógica do protocolo LoRaWAN;

d) Servidor de Aplicação: dispositivo em que a lógica do serviço é estabelecida, conforme os dados recebidos dos módulos.

Percebe-se que em uma arquitetura básica, os Módulos (dispositivos com sensores) enviam os dados para os *Gateways*, que os enviam pelos sensores aos Servidores de Rede e o grupo de dados recebidos chega aos Servidores da Aplicação, que estabelecem quais as ações a serem tomadas pelos módulos.

Para Kageyama e Menezes (2019), um dispositivo LoRa consegue promover uma boa relação entre potência de transmissão, sensibilidade do receptor em longas distâncias, reduzido custo do hardware e uma reduzida taxa de inconsistência na leitura dos dados transmitidos. Em aplicações de IoT no campo, por exemplo, estas são propriedades que ajudam na implantação da conectividade rural. Assim, sensores (que geralmente não teriam rede) podem ser dispostos em vários locais remotos (urbanos e rurais), com uma transmissão de dados eficiente, segura e com capacidade de fornecer aos dispositivos, a conectividade da internet por meio dos *Gateways*.

Portanto, a tecnologia é muito apropriada para que os dados alcancem distâncias consideráveis em áreas amplas, consumindo pouca energia para transmissão. Entretanto, para casos em que o volume de dados transmitido seja crítico à aplicação, pode ser que LoRa não seja a melhor alternativa, sendo este um desafio e limitação desta tecnologia.

As taxas de transmissão de LoRa possuem variação de 0,3 kbps a 50 kbps — geralmente, estas taxas seriam usadas somente para envio de mensagens de texto; voz, vídeo e outros tipos de dados precisariam de maior taxa de dados. Estas reduzidas taxas de transmissão, em contrapartida, elevam ao máximo a vida útil da bateria dos dispositivos finais (impedindo a necessidade de recargas) e da capacidade geral da rede (DA CRUZ e RAMOS, 2021).

De acordo com o manual da Semtech (SEMTECH, 2015), a modulação da LoRa possui alguns fatores chave, tais como:

a) Largura de banda escalável – a modulação LoRa é escalável em largura de banda e frequência, assim, pode-se empregá-la em aplicações de frequency hopping² de banda estreita e sequência direta de banda larga com somente algumas adequações de configuração nos dispositivos;

b) Encapsulamento e consumo de energia constante - os mesmos estágios de amplificação de potência de pouco consumo e elevada eficiência podem passar por reuso sem alteração. Também, por conta do ganho de processamento ligado ao LoRa, a potência de saída do transmissor pode ser diminuída, comparado ao FSK;

c) Alta robustez – podem ser alcançadas seletividade out-of-channel de 90 dB e rejeição co-canal melhor que 20 dB, comparados a 50 dB e -6 dB, respectivamente,

² É uma técnica de espalhamento espectral definida na mudança da portadora, empregando uma sequência pseudoaleatória conhecida pelo transmissor e receptor.

alcançados com o FSK. Isto acontece por conta do elevado produto largura de banda e tempo (> 1) e a natureza assíncrona do sinal LoRa;

d) Resistência a multipercurso e desvanecimento – sendo ideal para utilização urbana e suburbana por conta da propriedade banda larga do pulso LoRa, deixando-o imune a multipercurso e desvanecimento;

e) Resistência a efeito Doppler - efeito doppler ocasiona um pequeno desvio de frequência no pulso LoRa, que adentra um desvio desprezível no eixo do tempo do sinal de banda base, mitigando o requisito de fontes de clock com elevada precisão;

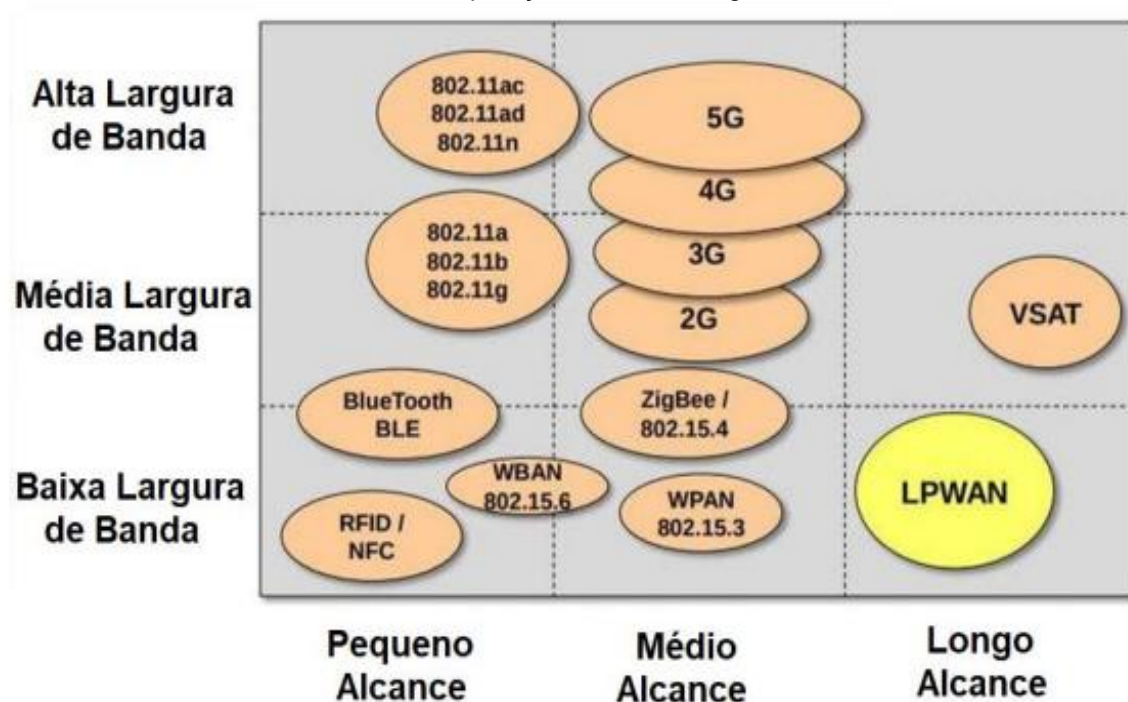
f) Capacidade de longo alcance - com potência de saída e vazão fixas, o cálculo de enlace do LoRa extrapola o do FSK. Quando se considera mecanismos de robustez, à interferência e desvanecimento, pode-se facilmente ser traduzido em um avanço no alcance de quatro vezes ou mais;

g) Capacidade de rede melhorada: a modulação LoRa utiliza fatores de espalhamentos ortogonais que admite que múltiplos sinais espalhados sejam transmitidos ao mesmo tempo e no mesmo canal, com uma reduzida degradação da sensibilidade do receptor. Os sinais com fatores de espalhamento distintos aparecem como ruído no receptor alvo e podem ser tratados desta forma.

Para Garcia e Kleinchmidt (2017), o tipo de frequência empregada pelas redes LPWAN modifica conforme a região de operação, sendo algumas das mais usadas as frequências ISM (*Industrial Scientific and Medical*) não licenciadas, como 169, 433, 868/915 MHz e 2.4 GHz.

O emprego do tipo de tecnologia wireless muda conforme os requisitos de alcance e largura de banda de cada execução. Uma conexão de longo alcance e baixa transferência de dados, por exemplo, um panorama típico de aplicações IoT e M2M (*Machine-to-Machine*), não recebe um suporte apropriado das tecnologias existentes. É neste âmbito que as tecnologias LPWAN se acertam, como é visto na FIGURA 4.

FIGURA 4 - Comparação entre tecnologias wireless.



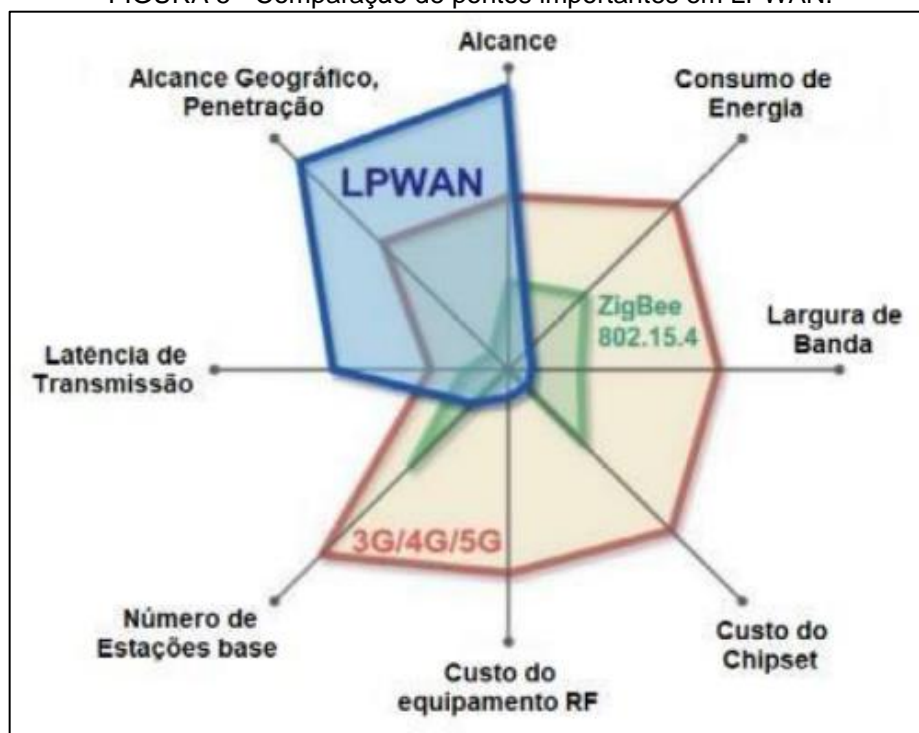
Fonte: Egli (2015).

Levam-se em conta ainda outras questões ao se comparar a tecnologia LPWAN com outras tecnologias como ZigBee e 3G/4G/5G. Pode-se citar o custo do mercado, que se torna quase irrelevante se comparado com 3G/4G/5G. A quantidade de estações base indispensáveis para se comunicar com os dispositivos, que também é reduzida se comparada com as tecnologias 3G/4G/5G e ZigBee, possibilitando desta forma, que somente uma estação base LPWAN se comunique com numerosos dispositivos. Destaca-se ainda a cobertura geográfica e capacidade de penetração que é extremamente superior da tecnologia LPWAN, em relação a tecnologia ZigBee (ORTIZ et al., 2019).

Tem-se na

FIGURA 5, uma comparação entre as tecnologias LPWAN, ZigBee e 3G/4G/5G de forma gráfica.

FIGURA 5 - Comparação de pontos importantes em LPWAN.



Fonte: Egli (2015).

Na TABELA 1, a seguir, nota-se uma relação entre as propriedades e grandezas da tecnologia LPWAN.

TABELA 1 - Propriedades e grandezas da tecnologia LPWAN.

| PROPRIEDADE | ESPECIFICAÇÃO GRANDEZA LPWAN |
|-------------------------|--|
| Alcance | 5 a 40 km em campo aberto |
| Vida útil da bateria | 10 anos |
| Latência de transmissão | Aplicações de IoT são caracteristicamente insensíveis à latência |
| Número de estações base | Muito baixa. Estações LPWAN são capazes de servir milhares de equipamentos |
| Área de cobertura | Extraordinárias para cobrir áreas rurais e remotas. Boas em relação a penetração em construções e seus interiores. |

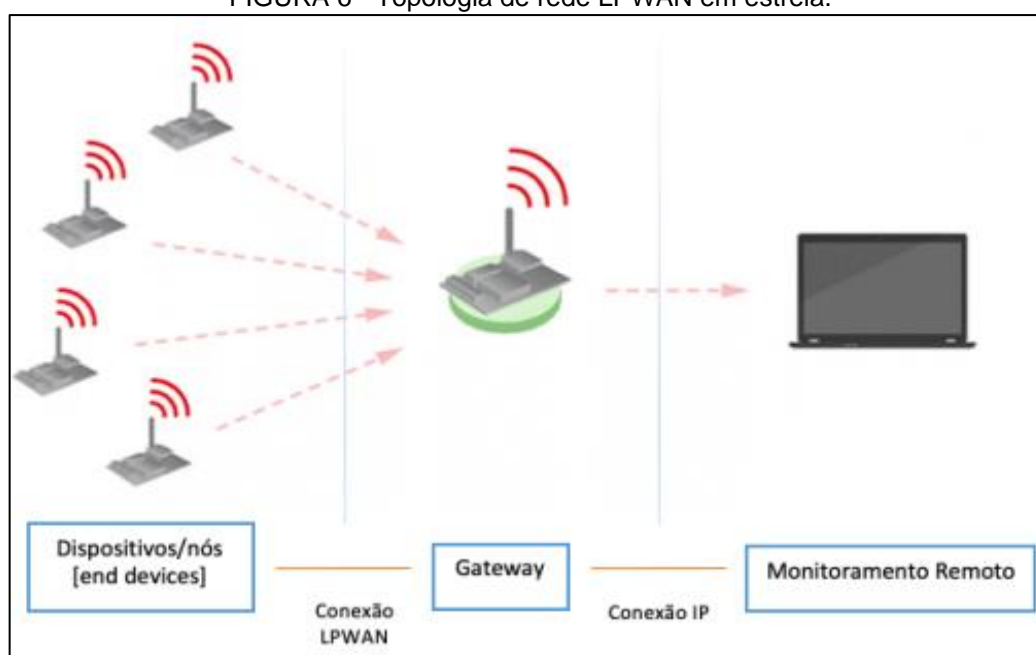
Fonte: Dias (2016)

Segundo Dias (2016), as tecnologias de rede LPWAN geralmente empregam a topologia estrela. Logo, todos os dispositivos interligados à rede são conectados absolutamente a um ponto de acesso. A depender da aplicação, para acobertar as áreas onde não existe cobertura do sinal, podem ser usados repetidores, provendo de

tal modo as necessidades de área de cobertura, latência e confiabilidade da rede (DIAS, 2016).

Em relação à topologia, na topologia em estrela, cada nó determina uma interconexão direta com o *gateway*, sem precisar de inter-comunicação entre os nós, ou seja, um *multi-hop* (LINK LAB'S, 2016). Na FIGURA 6 tem-se o layout da topologia de rede em estrela.

FIGURA 6 - Topologia de rede LPWAN em estrela.



Fonte: Cunha, 2021.

Isso porque a topologia em redes estrela é de fácil implementação e diminui a quantidade de tráfego de dados. Contendo somente enlace sem fio, a intercomunicação entre dispositivos para troca de mensagem adota o fluxo: nó, *gateway*, servidor, contudo, a comunicação entre *gateway* e servidor emprega a tecnologia de conexão IP.

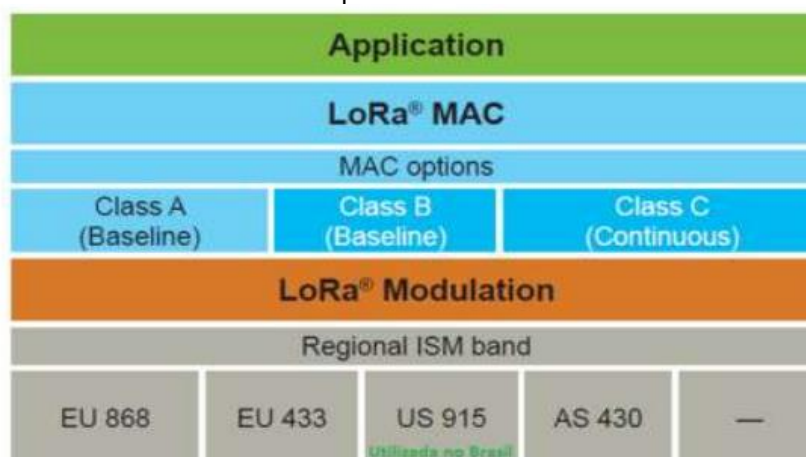
Portanto, o grande benefício da topologia em estrela é a centralização da rede e, assim, tem-se a facilitação da inspeção do tráfego da rede em apenas um ponto. Apesar disso, a grande desvantagem é que um erro no *gateway* pode desabilitar uma rede inteira. Porém, esta problemática pode ser simplesmente torneada com o emprego de *gateways* redundantes.

3.1.1 Protocolo de comunicação LoRaWAN

LoRaWAN é uma particularização aberta de um protocolo de redes de grandes setores que empregam a tecnologia LoRa e fornece comunicação bidirecional entre dispositivos, apoio a criptografia de ponta-a-ponta, mobilidade e serviços de localização. De tal modo, LoRa seria a camada física para transmissão de informação e o LoRaWAN, seria o protocolo de redes para abastecer a interoperabilidade entre os equipamentos (SANTOS JUNIOR, 2019).

LoRaWAN determina o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema para essa rede, de acordo com a FIGURA 7, enquanto a camada física LoRa admite que o link de comunicação possua longo alcance. O protocolo e a arquitetura de rede possuem mais impacto no estabelecimento da vida útil da bateria de um nó, na capacidade da rede, na qualidade do serviço, na segurança da informação e na variedade de aplicativos acolhidos por essa rede.

FIGURA 7 - Arquitetura do Protocolo LoRa.



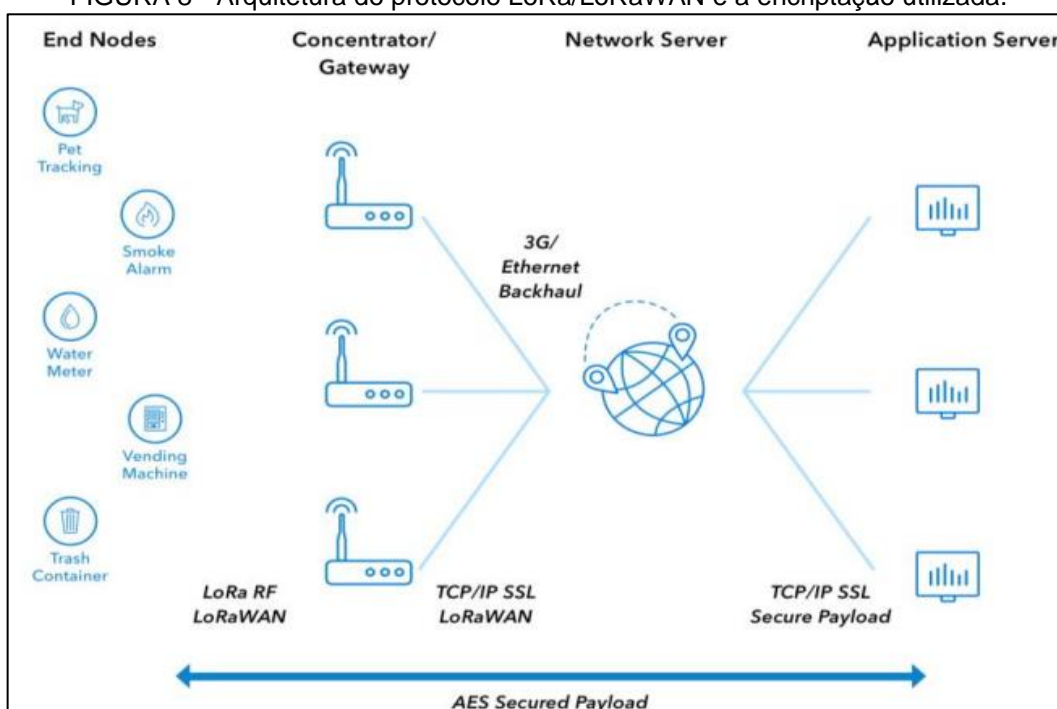
Fonte: Lora Alliance, 2018.

Suportado sobre a camada física do LoRa, o protocolo introduz-se na camada MAC (*Medium Access Control*) de acordo com o modelo OSI (*Open System Interconnection*). Logo, diz respeito à segunda e terceira camada do modelo. Todo o processamento e gestão da rede é executado pelo servidor. De tal modo, o processamento nos dispositivos de campo, quer sejam eles *gateways* ou nós, é diminuído ao máximo, sendo que estes somente fazem a interação com o meio e/ou, no mínimo, o envio dos dados de maneira ascendente, ou seja *uplink* (RABUSKE, 2017).

Isso explica o período de duração das baterias destes dispositivos, que de acordo com a LoRa Alliance (2018), podem chegar até aos 10 anos.

Em contrapartida, o protocolo em si estabelece um mecanismo de segurança AES (Advanced Encryption Standard), 128 bits, que encripta as comunicações quer entre o dispositivo e o servidor quer entre o dispositivo e a aplicação. O que torna as comunicações bastante seguras. A FIGURA 8 apresenta a arquitetura do protocolo e a encriptação empregada. Este também admite o uso de gateways de outros proprietários para o envio das mensagens para o servidor, com extrema segurança, sem que este tenha acesso ao dado.

FIGURA 8 - Arquitetura do protocolo LoRa/LoRaWAN e a encriptação utilizada.



Fonte: Lora Alliance, 2018.

Nota-se que em uma rede LoRaWAN, os nós não estão conexos a um concentrador específico. Em vez disso, os dados transmitidos por um nó são geralmente recebidos por diversos concentradores. Cada concentrador encaminhará o pacote recebido do nó final para o servidor de rede baseado em nuvem através de algum *backhaul* (celular, Ethernet, satélite, Wi-Fi) (ALVES et al., 2021).

A inteligência e a complexidade são transferidas para o servidor de rede, que gerencia a rede e filtra os pacotes recebidos redundantes, realizará verificações de segurança, agendará confirmações através do concentrador ideal e executará taxas de dados adaptáveis. Se um nó for móvel ou em movimento, nenhum *handover* é necessário ao se registrar em um novo concentrador, que é um recurso indispensável

para acionar aplicativos de rastreamento de ativos - um aplicativo de destino principal vertical para IoT (SANTOS et al., 2021).

Os nós de uma rede LoRaWAN são assíncronos e se comunicam quando têm dados prontos para serem enviados, sejam eles controlados por eventos ou agendados.

Esse tipo de protocolo é fundamentado no método Aloha, com uma eficiência muito mais em LoRaWAN, versus *pure Aloha*. Em uma em malha ou síncrona, como celular, os nós repetidamente necessitam "acordar" para sincronizar com a rede e examinar se existem mensagens (HAXHIBEQIRI, 2017).

Essa sincronização demanda muita energia e é a principal razão para diminuição da vida útil da bateria.

Em um estudo recente e comparação realizada pela GSMA a respeito de várias tecnologias LPWAN, o LoRaWAN demonstrou uma vantagem de 3 a 5 maior na questão de vida útil da bateria, em comparação a outras tecnologias LPWAN (LORA ALLIANCE, 2018).

A fim de viabilizar uma rede em topologia estrela de longo alcance, o concentrador precisa ter uma capacidade muito elevada de receber mensagens de um volume enorme de nós (dispositivos). A elevada capacidade de uma rede LoRaWAN é alcançada empregando uma taxa de dados adaptável e utilizando um transceptor multicanal no concentrador para que as mensagens simultâneas em múltiplos canais consigam ser recebidas (ARRUDA et al., 2019).

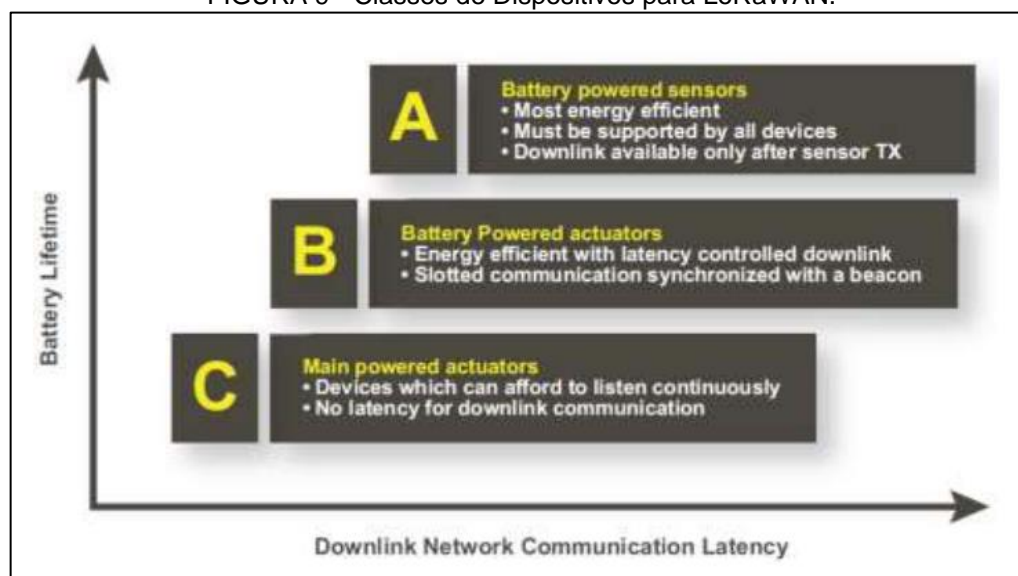
Os fatores críticos que impactam na capacidade são: o quantitativo de canais simultâneos, taxa de dados, o tamanho do *payload* e com que frequência os dados dos nós são transmitidos. Como LoRa usa *spread spectrum*, os sinais são praticamente ortogonais entre si quando diversos fatores de espalhamento são empregados. Ao passo que o fator de propagação altera, a taxa de dados efetiva também altera (HAXHIBEQIRI, 2017).

O concentrador aproveita essa propriedade, sendo capaz de receber várias taxas de dados diferentes no mesmo canal ao mesmo tempo. Se um nó tiver um bom link e estiver próximo a um concentrador, não existirá razão para utilizar sempre a menor taxa de dados e preencher o espectro disponível por mais tempo do que é preciso. Ao deslocar a taxa de dados para cima, o tempo no ar é reduzido, abrindo mais espaço em potencial para que outros nós transmitam. A taxa de dados adaptativa também aprimora a vida útil da bateria (BARRIQUELLO et al., 2017).

Esses recursos possibilitam que uma rede LoRaWAN tenha uma capacidade muito alta e torne a rede escalável. Uma rede pode ser inserida com uma infraestrutura mínima e, quando for necessário, mais concentradores podem ser somados, mudando as taxas de dados e diminuindo a latência em outros concentradores. Outras opções de LPWAN não têm a escalabilidade do LoRaWAN por conta da defasagem tecnológica, que restringem a capacidade de *downlink* ou tornam o alcance de *downlink* assimétrico à faixa de *uplink* (LORA ALLIANCE, 2018).

Segundo Barriquello et al. (2017), os terminais precisam atender a diversas aplicações e têm requisitos diferentes de rede. Para aprimorar uma variedade de perfis de aplicativos finais, LoRaWAN emprega diferentes classes de dispositivos, como é notado na FIGURA 9. As classes de dispositivos alternam a latência de comunicação de *downlink* da rede com a duração da bateria. Em uma aplicação de controle ou atuação, a latência da comunicação de *downlink* é um fator decisivo.

FIGURA 9 - Classes de Dispositivos para LoRaWAN.



Fonte: Lora Alliance, 2018.

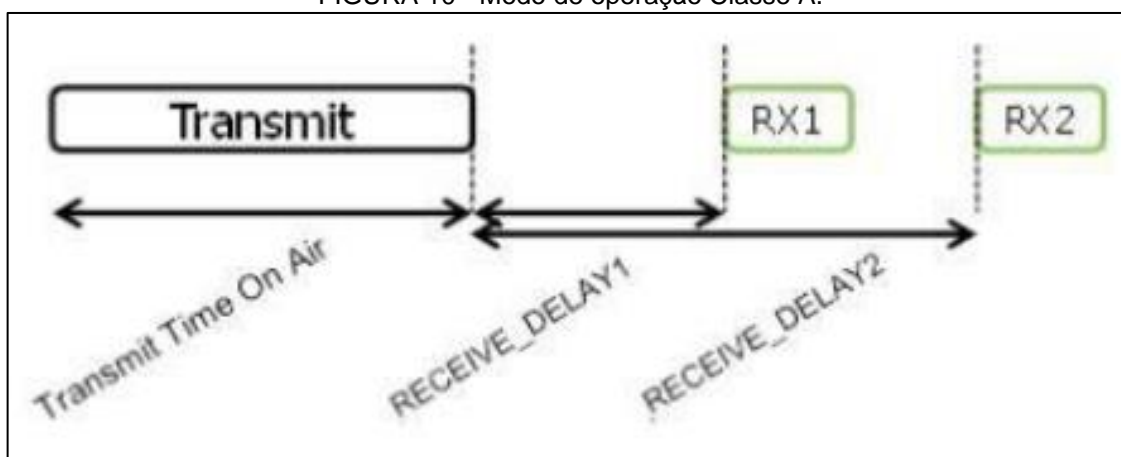
A fim de conseguir atender os diversos tipos de aplicações, o LoRaWAN é dividido em três tipos de operação para os dispositivos finais, sendo elas classe A, B e C, conforme Lora Alliance (2018) e Werner (2018):

Classe A: nesta classe, a comunicação é completamente assíncrona e sempre começada pelo dispositivo final. O dispositivo final pode entrar em modo de suspensão determinada pela aplicação, o que oferece uma diminuição no emprego de energia. O slot de transmissão programado pelo dispositivo é baseado em suas próprias

necessidades de comunicação com uma reduzida variação baseada em uma base de tempo aleatório (como no protocolo ALOHA - *Advocates of Linux Open-source Hawaii Association*). Esta classe ainda é análoga a ALOHA, pois o dispositivo final pode acessar a rede mandando um CRC (Cyclic Redudancy Check) sempre que tiver dados para transmitir. Depois da transmissão (*Uplink*) são fornecidas sempre duas janelas curtas de recepção (*Downlink*), possibilitando uma comunicação bidirecional ou algum comando de controle. Essa classe é caracteristicamente empregada em sensores em geral, em que as medições são armazenadas em algum sistema de aquisição de dados e atualizadas nos agendamentos.

Seu modo de operação pode ser visto na FIGURA 10, a seguir.

FIGURA 10 - Modo de operação Classe A.



Fonte: Sornin (Semtech) et al., 2016.

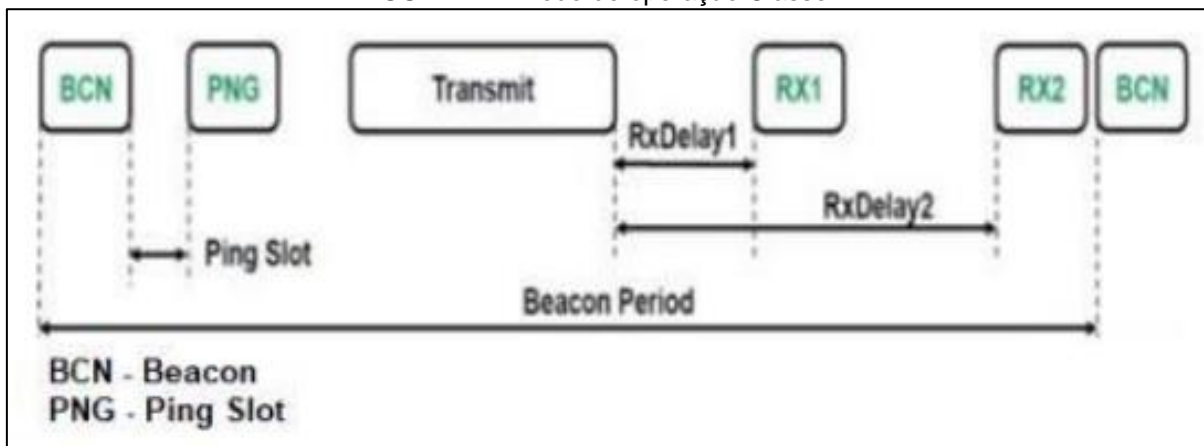
b) Classe B: na classe B, tem-se dispositivos bidirecionais com um modo operação análogo ao protocolo *slotted* ALOHA³, em que a sincronização é desenvolvida de tempos em tempos com o envio de *beacons* pelo *gateway*, por meio dos quais é aberta uma janela de transmissão com o dispositivo final denominada *ping-slot*, ou seja, slots de recebimento programados. Neste momento ocorre o *uplink* e em seguida, o *gateway* pode desenvolver a operação de *downlink*. Além das janelas de recebimento aleatório da Classe A, os dispositivos de Classe B abrem janelas de recebimento extra em horários programados pela aplicação com uma latência de até 128 segundos para serem enviadas em horários característicos. Apesar desta

³ Slotted ALOHA: Trata-se de uma versão alterada do protocolo ALOHA. No protocolo slotted ALOHA a transmissão é dividida em intervalos de tempos de igual comprimento e o envio de dados é desenvolvido somente no começo de um intervalo de tempo (VIEIRA et al, 2006).

configuração ter um consumo adicional de energia ainda permanece sendo viável para aplicações alimentadas por bateria.

Seu modo de operação é notado na FIGURA 11.

FIGURA 11 - Modo de operação Classe B.

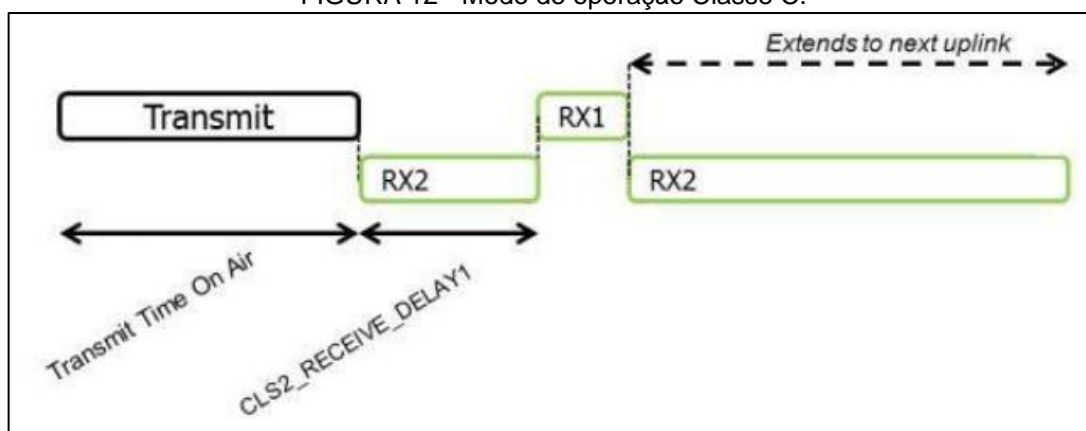


Fonte: Sornin (Semtech) et al., 2016.

c) Classe C: nesta classe, há inteira liberdade de recepção de dados por parte dos dispositivos finais, exceto na situação que o mesmo esteja desenvolvendo uma operação *uplink*, quando assim a janela de recepção é fechada. Trata-se do modo mais custoso quanto ao consumo de energia, por isso é indicado para aplicações onde o *end-point* esteja interligado a uma fonte de energia contínua e não uma bateria. Além de ter a estrutura de *uplink* da classe A seguida por duas janelas de *downlink*, este é o modo que fornece menor latência para *downlink*.

Seu modo de operação é visto na FIGURA 12.

FIGURA 12 - Modo de operação Classe C.



Fonte: Sornin (Semtech) et al., 2016.

Na TABELA 2, a seguir, tem-se as principais características de cada uma das classes de uma forma bem simplificada.

TABELA 2 - Principais características dos dispositivos LoRa.

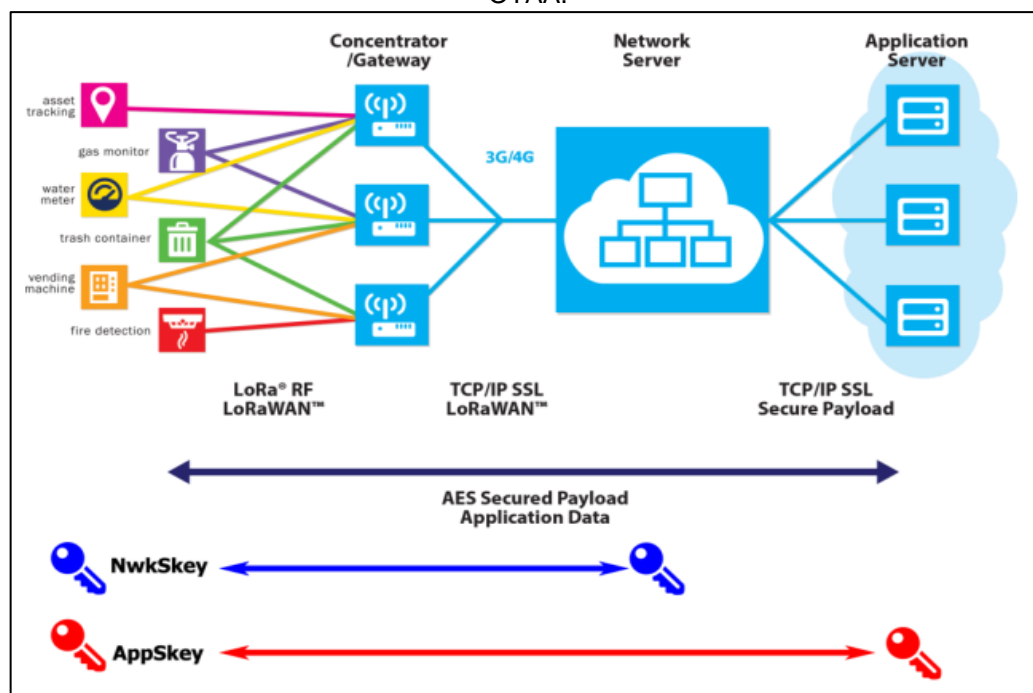
| | CLASSE A | CLASSE B | CLASSE C |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Tipo | Alimentado por Bateria | Baixa Latência | Sem Latência Alimentação externa |
| Comunicação | Bidirecional | Bidirecional | Bidirecional |
| Mensagem | Unicast | Unicast e Multicast | Unicast e Multicast |
| Latência mensagens | Longos intervalos | Longos intervalos | Mensagens podem ocorrer a qualquer momento |
| Quem e quando começa comunicação? | End-device quando algo acontece | Network server pode iniciar em intervalos fixos e regulares | End-devices e Network server a qualquer momento |

Fonte: Garcia e Kleinschmidt, 2017.

Após a discussão dos tipos de classes de dispositivos para LoRaWAN, destaca-se que para se ter o máximo alcance possível, o servidor implementa mecanismos de ajuste das taxas de envio de dados, ADR (*Adaptative Data Rate*), por meio da manipulação do SF (*Spreading Factor*), da largura de banda e da potência de sinal (ALVES et al., 2021).

Outra característica é o modo de ativação dos dispositivos. Há duas maneiras possíveis: a OTAA (*Over The Air Activation*) e a ABP (*Activation By Personalization*). Na primeira situação, os dispositivos executam um procedimento para aceder a rede em que as chaves são negociadas, AppSKey (*Application Session Key*), NwkSKey (*Network Session Key*) e o endereço do dispositivo é conferido (DevAddr), como é visto na FIGURA 13. Este é o procedimento mais seguro, já que estes processos são conferidos de forma dinâmica, contudo, apresentam como necessidade principal a existência de *downlink* na rede.

FIGURA 13 - Procedimento de aceder a rede onde as chaves são negociadas, no modo de ativação OTAA.



Fonte: Sornin (Semtech) et al., 2016.

Em contrapartida, no caso do ABP, para a ativação do dispositivo é necessária a criação de um endereço e das chaves, e posterior programação deste com estes valores. Este é um procedimento menos seguro já que as chaves são criadas antes do processo, podendo ser empregadas por outro dispositivo sendo que também não existe confirmação da correta correspondência das chaves com o dispositivo pelo que este é programado anteriormente (PEREIRA, 2019).

3.1.2 Funcionamento das redes LoRa

A rede LoRa tem uma modulação específica e utiliza o conceito de Spread Spectrum (Espalhamento Espectral), com três parâmetros de configuração que estabelecem o *Bit Rate*, o máximo *Payload Size* e o *Time on-air*, impactando no tamanho das mensagens, alcance e consumo de energia.

Esta mesma parametrização possibilita que LoRa gerencie a taxa de dados e a potência de saída do Radiofrequência em cada *end-device* (dispositivo final) por meio do conceito de *Adaptative Data Rate* (ADR), em busca de otimização das taxas de transmissão, aumento de capacidade da rede e redução no consumo de energia (GARCIA e KLEINSCHMIDT, 2017):

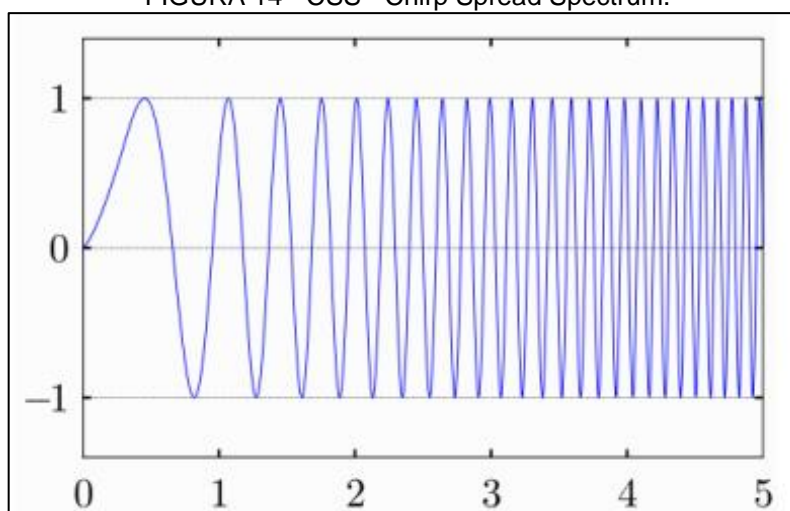
a) *Spreading Factor* (SF): Quanto maior o SF, maior a quantidade de informações transmitidas por *bit*, o que também causa um ganho de processamento. De acordo com Magrin et al. (2017), o fator de espalhamento espectral pode variar de 7 a 12.

b) *Bandwidth* (BW): O emprego de um BW mais estreito leva a um aumento na sensibilidade de recepção além de incrementar o *air time*. Para um dado SF, a largura pode ser de 125 KHz, 250 KHz ou 500 KHz. Werner (2018) cita que pode existir uma variação na banda do sinal (BW) de 125 KHz até 250 KHz.

c) *Forward Error Correction* (FEC / *Code Rate* (CR): Desenvolve a regulação da identificação e correção de erros. Para Werner (2018), o parâmetro *Code Rate* (CR) pode ter uma variação de 0 a 4.

Werner (2018) destaca que o funcionamento do CSS (Chirp Spread Spectrum) se dá por meio de um sinal senoidal chamado Sinal Chirp, como é visto na FIGURA 14, ao decorrer do tempo e conforme o sinal de informação, o sinal Chirp aumenta ou reduz a sua frequência.

FIGURA 14 - CSS - Chirp Spread Spectrum.



Fonte: Johann, 2010.

3.1.3 Vantagens das redes LoRa

De acordo com Alves et al. (2021), algumas das principais vantagens da LoRa são:

- a) Possibilita transmissões sem fio em ambientes urbanos, em distâncias que vão desde 3 a 4 km;
- b) Em áreas rurais, as distâncias alcançam até 15 km;
- c) O gasto energético é muito baixo, com uma potência de 20 dbm ou 100mW;
- d) Por exemplo, um rádio conectado em LoRa na potência máxima tem picos de 0,12A, contra 2A da rede GSM;
- e) Tem uma especificação de camada lógica simples e flexível, sendo ideal para IoT
- f) Utiliza uma modulação complexa chamada Chirp Spread Spectrum (CSS);
- g) Esta modulação é muito resistente à interferência e possibilita recuperação de sinal com eficiência.

3.2 IMPLEMENTAÇÕES DA REDE LORA

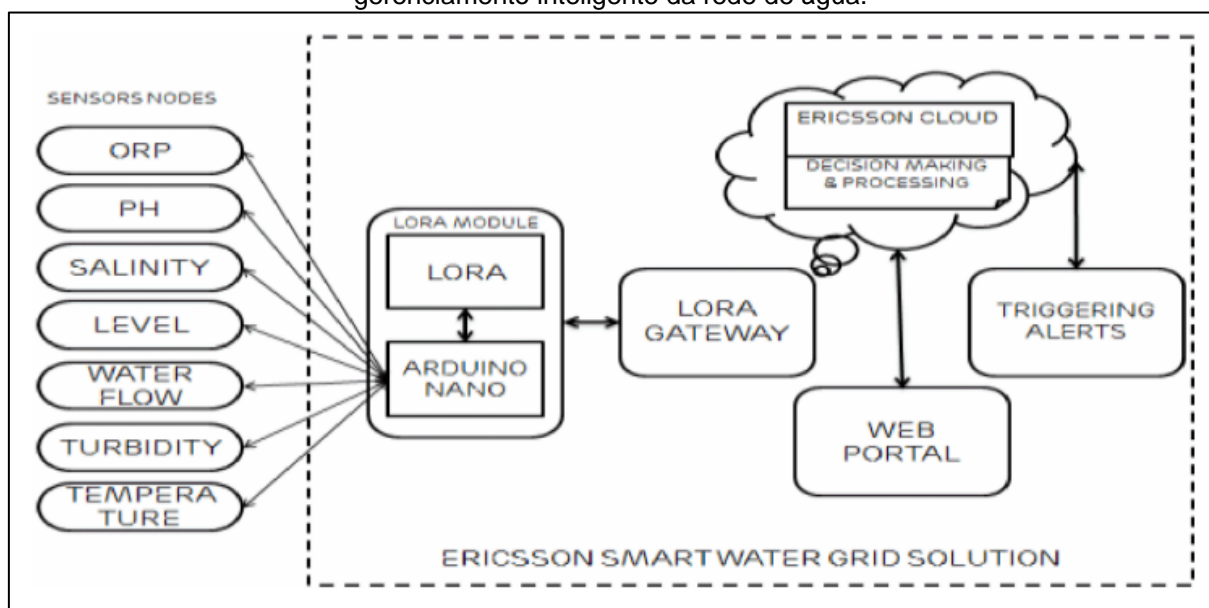
Algumas aplicações da rede LoRa, em que os requisitos são baixa taxa de transmissão de dados e longo alcance da rede, pode ser como: medição inteligente de gás, água, eletricidade e lixo, monitoramento da infraestrutura de túneis, pontes e edifícios e monitoramento de condições ambientais como poluição e clima e ainda monitoramento em tempo real de parâmetros de Equipamentos Médico Hospitalares ou ambientes críticos. Outros casos de uso são o rastreamento de veículos, tanto carros, como bicicletas e motocicletas e o monitoramento da saúde e bem-estar de pessoas.

3.2.1 Gerenciamento inteligente da rede de água

Em seu trabalho, Saravanan e Iyer (2017) emprega a tecnologia IoT LoRa no sistema de gerenciamento inteligente da rede de água. Para isso, os autores fizeram um projeto piloto em Mori, na Índia. Para medir a qualidade da água, implementaram-se diversos sensores em múltiplos locais selecionados estrategicamente, conectados a um microcontrolador presente no módulo LoRa. Esses, se comunicam na nuvem

por meio de um *gateway* LoRa, gerando dados em tempo real, como visto na FIGURA 15.

FIGURA 15 - Arquitetura da solução proposta por Saravanan e Iyer (2017) para o sistema de gerenciamento inteligente da rede de água.



Fonte: Saravanan e Iyer, 2017.

O sistema de Saravanan e Iyer (2017) também demonstra uma solução para lidar com os bloqueios que foram utilizados dentro e ao redor da vila para controlar o fluxo de água instantaneamente. Além disso, oferece um mecanismo que informa, por SMS e e-mail, os diversos níveis de autoridades em situação de problemas. Por meio do modelo de regressão logística, os autores conseguiram analisar os dados armazenados na nuvem para cada módulo LoRa e concluíram que o modelo testado resultou em um elevado nível de precisão no controle da água.

3.2.2 Conectividade no campo

Quanto aos processos agrícolas e integração à Internet das Coisas, a conectividade no campo sempre teve grandes gargalos para a efetiva revolução tecnológica na agricultura e pecuária e dentro deste conceito, LoRa chegou com grandes oportunidades de conexão.

Tem-se vários tipos de sensores que podem ser empregados no campo, em estufas ou para rastrear um equipamento agrícola. Todos esses sensores, como medidores de umidade do solo e ar, de temperatura, PH, irradiação solar e anemômetros, não precisam enviar grandes volumes de informação instantaneamente. Assim, redes LoRa são uma grande alternativa para digitalização no campo, ajudando em processos de tomada de decisão fundamentada em dados, diminuição de perdas e aumento de produtividade (TEIXEIRA e ALMEIDA, 2017).

Alguns sensores de umidade ficam no campo, em locais que normalmente não teriam conexão de dados. Estes sensores (os Módulos, dentro da arquitetura) usam a tecnologia LoRa para enviar informações aos *Gateways* da rede, que se comunicam com a rede e encaminham as informações obtidas pelos sensores aos servidores de rede. Os servidores roteiam as informações para os Servidores de Aplicação, que definem o que será realizado com os dados recebidos dos sensores (OLIVEIRA, 2021).

Todo o processamento é realizado nos servidores de aplicação. Assim, com as informações recebidas, os Servidores de Aplicação podem enviar sinais que transitam pela rede LoRa em sentido inverso, até chegar a um eventual Módulo cuja função seja irrigação. Esse sinal ativa o Módulo que desenvolve a irrigação conforme as necessidades retiradas dos dados (OLIVEIRA, 2021).

Para Faria e Cavazotti (2019), com o uso da tecnologia LoRa na agricultura, pode-se ter a digitalização do campo, como:

a) Aquisição de dados – onde os dados são coletados, como umidade do solo e ar, temperatura, PH, irradiação solar e coordenadas de GPS, e possibilitam uma análise quantitativa de variáveis ambientais e elaboração de um histórico de dados. Assim, o processamento dos dados brutos admite detectar padrões e gargalos para ajudar nas tomadas de decisões em processos agrícolas;

b) Comunicação entre máquinas – a rede LoRa admite a comunicação entre as máquinas no campo, para rastreamento e localização. Assim, pode-se monitorar o atuação da operação com dados de telemetria, como valores de temperatura do motor, velocidade, horas em funcionamento e as coordenadas do GPS no momento do envio das informações;

c) Comunicação entre funcionários – tem-se a possibilidade de comunicação entre trabalhadores dentro da propriedade, sem empregar a rede de operadoras de celular. Para comunicações simples, LoRa pode ser uma alternativa muito

interessante, pois pode agir por meio de longas distâncias de maneira independente de operadoras.

Neste sentido, a AgroThings (2019) criou duas infraestruturas de redes com protocolo de comunicação LoRaWan, sendo uma em cada fazenda, São Luís e Palmeira, pertencentes ao Grupo Ariel Horovitz em São Desidério – BA, para se ter a conectividade em toda extensão da fazenda, totalizando em 20 mil hectares.

Nos trabalhos da Agrothings (2019), os equipamentos são monitorados minuto a minuto, tais como: tratores, colheitadeiras, pulverizadores, pivôs de irrigação e as casas de captação de água. Destaca-se que na situação das máquinas agrícolas, como: tratores, colheitadeiras e pulverizadores, o monitoramento em tempo real, possibilitou a visibilidade da operação no campo e a correção imediata dos erros operacionais, ocasionando alguns benefícios ao produtor, como:

a) Qualidade na produção a partir do acompanhamento da velocidade da máquina em operação de atividades importantes (plantio, aplicação de químicos e colheita);

b) Prolongamento da vida útil das máquinas, diminuindo as quebras e controlando as manutenções por meio do controle por horas trabalhadas;

c) Economia no consumo de combustível;

d) Menos desgaste dos pneus, aumento do tempo de troca de filtros, correias, retentores, fundamentado no uso correto das máquinas pelos operadores.

Na FIGURA 16, pode-se notar vários equipamentos conectados à uma rede LoRa, na agricultura.

FIGURA 16 – Equipamentos conectados à uma rede LoRa, no campo.



Fonte: AgroThings, 2019.

O monitoramento dos equipamentos, por meio da solução AgroThings (2019) através da rede LoraWan, trouxe uma grande agilidade no planejamento de irrigação, admitindo ação imediata em casos de queda de energia elétrica. Além de dar visibilidade ao gestor seguindo remotamente o pivô em ação, no caso de monitoramento de pivô, pode-se ter a informação do lado que está irrigando, velocidade do pivô, o fluxo de água e a porcentagem da área irrigada.

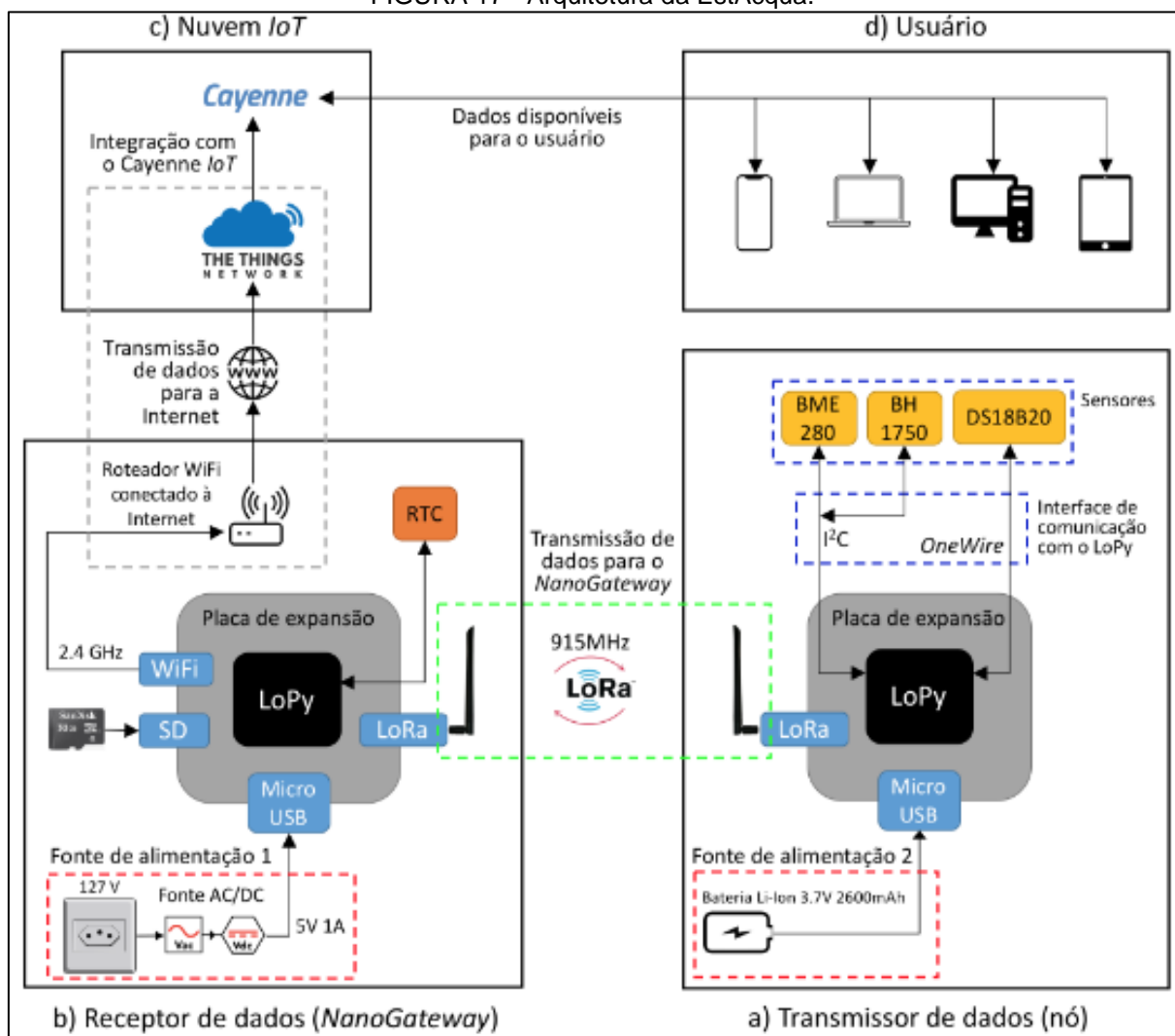
3.2.3 Detecção de desastres naturais e monitoramento ambiental

Por atuar em grandes distâncias e informações bidirecionais, a tecnologia LoRa é útil em circunstâncias de emergência. Como as baterias dos dispositivos não necessitam ser substituídas com frequência, sensores podem ser instalados em áreas remotas de difícil acesso. Por exemplo, no caso de um tsunami ou enchente, se uma ponte provida desta tecnologia ficar submersa, sensores de pressão e umidade podem identificar a ocorrência e transmitir as informações para uma central de monitoramento ambiental, que saberá o horário que aconteceu, intensidade dos estragos e ainda pode avisar à população sobre possíveis rotas de fuga alternativas (HELAL et al., 2018).

Em sua pesquisa, Helal et al. (2018) apresentou a construção de um protótipo, designado EstAcqua, de uma estação ambiental e oceanográfica com sensores de superfície e submersos de reduzido custo, com hardware de baixo custo, empregando transmissão de dados sem fio via LoRaWAN e software aberto com baixo consumo de energia e longo alcance de transmissão.

A EstAcqua tem sensores de iluminância, pressão atmosférica, umidade, temperatura externa e subaquática. A arquitetura EstAcqua é dividida em quatro partes: um ou mais nós transmissores de dados, receptor de dados, nuvem de IoT e interação com o usuário (HELAL et al., 2018), como é visto na FIGURA 17.

FIGURA 17 - Arquitetura da EstAcqua.

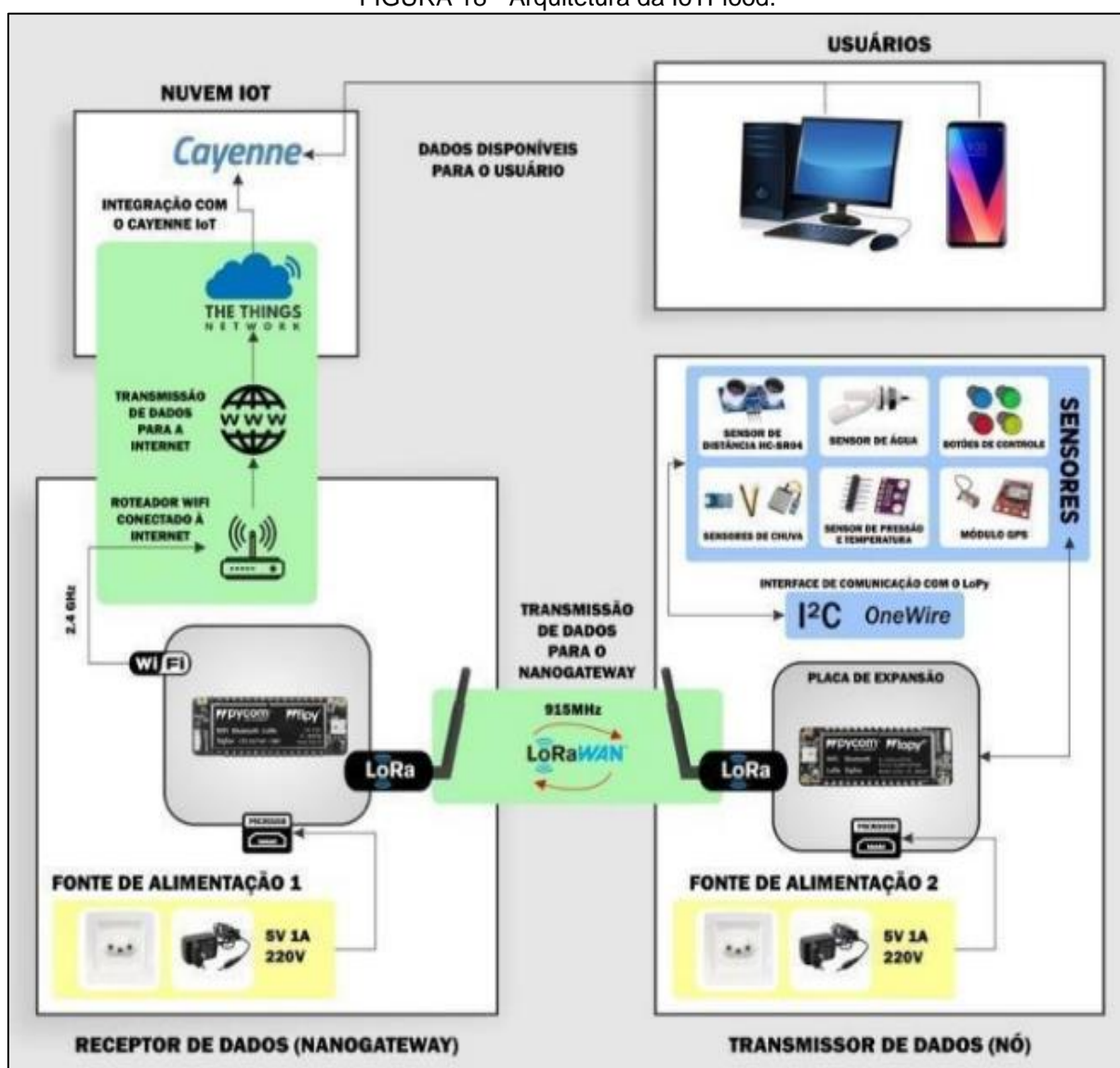


Fonte: Helal et al., 2018.

Enquanto Vital et al. (2020), neste ramo, projetou a lotFlood, que se diferencia da EstAcqua por ser aplicado ao monitoramento de enchentes em lagoas e rios, tendo como referência os sensores de nível, de localização (GPS), de chuva, ultrassônico, temperatura e pressão, que por conta de sua aderência a IoT, os dados dos sensores podem ser acessados por meio de uma interface Web ou de um celular, sem a necessidade de infraestrutura existente no local de instalação da lotFlood. Nesta pesquisa, utiliza-se hardware de baixo custo, software de código aberto e serviços

online gratuitos para a visualização dos dados coletados, de acordo com a arquitetura exposta na FIGURA 18.

FIGURA 18 - Arquitetura da IoTflood.



Fonte: Vital et al., 2020.

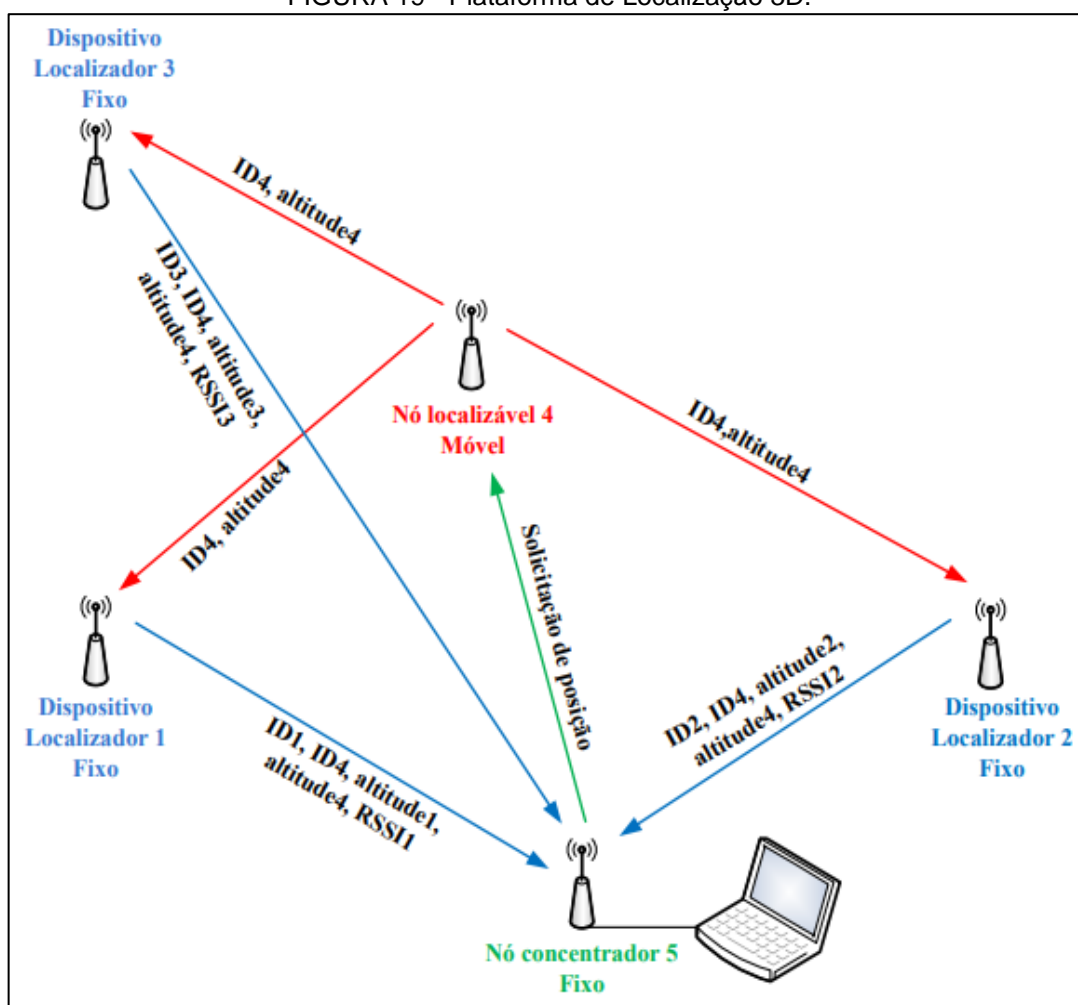
3.2.4 Localização de bens

Micheletti (2021) afirma que uma grande corporação norte-americana, cliente da *Orange Business Services*, implementou uma solução IoT com uso LoRa, conectada a uma rede LoRaWAN privada para que pudesse monitorar bens como empilhadeiras e caminhões dentro e fora dos seus mais de 5km de túneis, pelos quais

faz transporte de materiais. A mesma empresa empregou a solução para monitorar a localização de vários objetos de arte localizados em sua maior planta, promovendo mais segurança a esses bens com uma estrutura de comunicação de baixo custo e que utiliza sensores com bateria de vida longa.

Neste sentido, Micheletti (2021) fez um projeto em que desenvolve um sistema para localização 3D de objetos (representado por um nó), empregando comunicação em uma rede sem fio LoRa e o uso desse mesmo sistema para Rastreamento de objetos (objeto em movimento), dentro da mesma área de testes (área de cobertura do sistema). A FIGURA 19 demonstra a plataforma proposta para Localização 3D de Micheletti (2021):

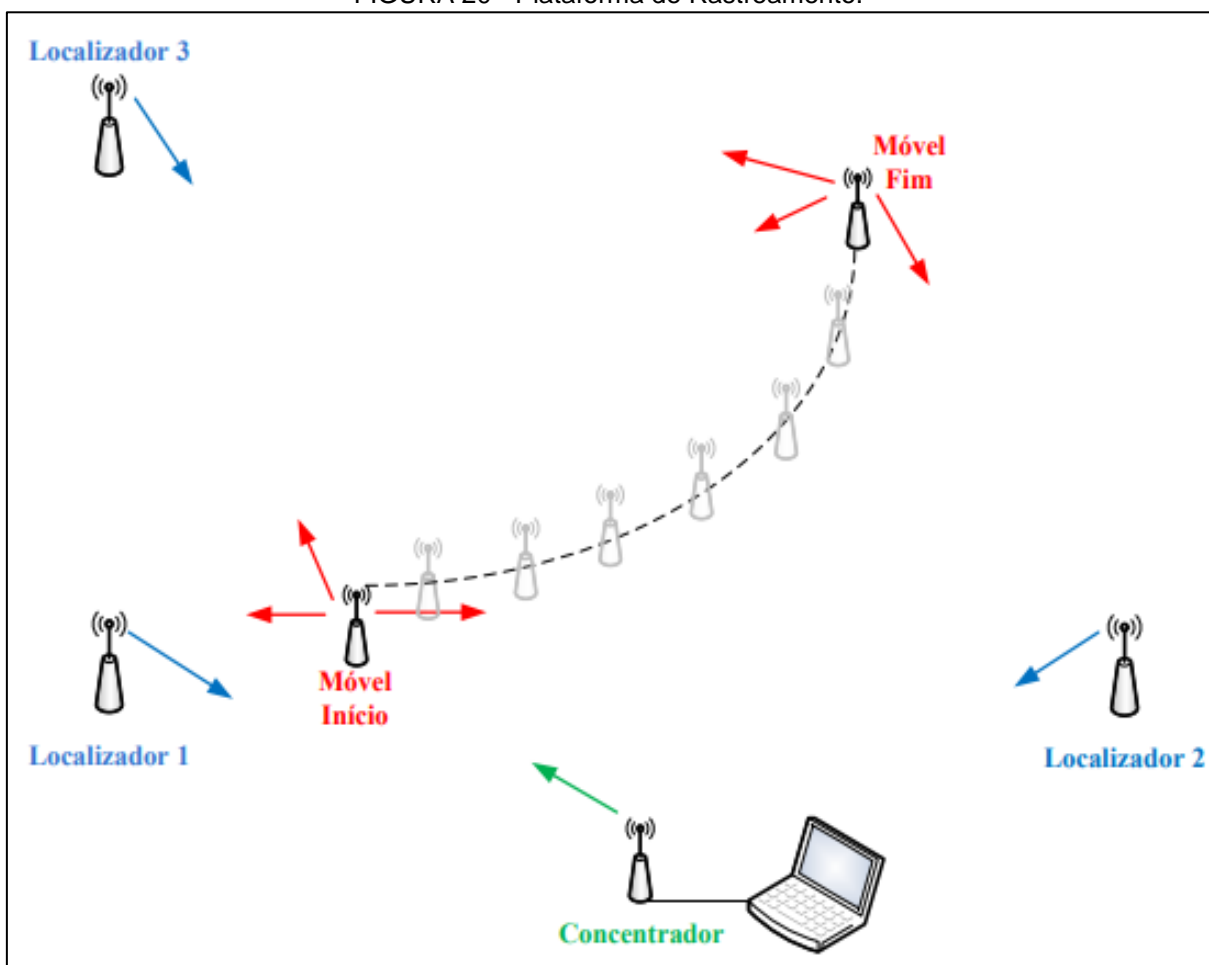
FIGURA 19 - Plataforma de Localização 3D.



Fonte: Micheletti, 2021.

Este sistema exibe uma rede sem fio fundamentada no protocolo de comunicação LoRa, na faixa de 915 MHz, composta por ao menos quatro elementos fixos, sendo neste caso três Localizadores e um Concentrador, além de ao menos um elemento móvel, o Localizável. Esse mesmo processo foi empregado tanto para a localização como para o rastreamento, sendo que para este, o tempo de aquisição de dados e cálculo de cada posição foi variado, com o intuito de verificar o mais real possível, a trajetória do objeto em movimento, visto na FIGURA 20.

FIGURA 20 - Plataforma de Rastreamento.



Fonte: Micheletti, 2021.

Com todos esses casos de sucesso implantados, pode-se notar que as redes LoRa são uma solução de conectividade que possibilitam a gerência no campo, conseguindo cobrir grandes áreas sem a necessidade de repetição de sinal, assim como pode-se ter gerenciamento inteligente da rede de água, detecção de desastres naturais e monitoramento ambiental e localização de bens, garantindo maior eficiência e eficácia na entrega dos dados.

3.3 INOVAÇÕES NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES COM O USO DA TECNOLOGIA LORA

Segundo Garcia e Kleinschmidt (2017), ao contrário de outras tecnologias disruptivas que podem delongar para alcançar adoção global, a tecnologia Rádio frequência sem fio LoRa não é uma promessa de um potencial futuro, porém está disponível hoje em todo o planeta. Com diversos casos de uso conhecidos e mais de 191 milhões de dispositivos implantados em todos os continentes habitados para o sistema, os dispositivos LoRa e o padrão LoRaWAN® estão designando um Smart Planet (GARCIA e KLEINSCHMIDT, 2017).

O analista de indústria ABI Research projeta que mais de 50% de todas as conexões de área ampla não celulares de baixa potência terão LoRa em 2026. LoRa está percebendo o grande potencial da Internet das Coisas (AUGUSTIN et al., 2016).

Assim, enquanto o 5G foi projetado para promover conectividade e velocidades mais velozes, os dispositivos LoRa e o padrão LoRaWAN atendem a casos de empregos distintos em que os dispositivos devem ser operados por bateria e durar em campo por longos períodos de tempo (AUGUSTIN et al., 2016).

O padrão LoRaWAN possui um alcance de comunicação de mais de 48 km, que é mais longe do que a variante mmWave de 5G. Enquanto o 5G pode ser ideal para chamadas de vídeo ou aplicativos de latência ultrabaixa, o LoRaWAN é ideal para medição de água e gás, rastreamento de ativos e diversos outros aplicativos onde é preciso baixo consumo de energia e longo alcance. Além das capacidades de longo alcance dos dispositivos LoRa, ele tem o poder de adentrar em estruturas físicas onde os sinais 5G não podem (MEKKI et al., 2018).

Como o Wi-Fi, o LoRaWAN atua na banda não licenciada e promove suporte a aplicativos internos; como o celular, o LoRaWAN é altamente seguro desde os dispositivos finais até o servidor de aplicativos e é apropriado para aplicações externas. Os dispositivos LoRa e o padrão LoRaWAN acordam esses recursos de redes Wi-Fi e celulares para dar uma solução de conectividade eficiente, flexível e econômica, ideal para que aplicações IoT sejam internas ou externas e instaladas em redes públicas, privadas ou híbridas (SANTOS et al., 2021).

Dados de sensor simples podem alimentar plataformas analíticas, como as de inteligência artificial e aprendizado de máquina. Isso demanda diversidade de dados, permitida por sensores de baixo custo com LoRa (MEKKI et al., 2018).

O ecossistema que dá suporte a LoRa e LoRaWAN abrange uma coleção ampla de operadoras de rede, fabricantes de hardware, designers de software, provedores de serviços, universidades e associações da indústria que cumprem uma função essencial na criação e habilitação de dispositivos, redes e aplicativos. O ecossistema está crescendo ininterruptamente – e permanece a crescer a uma taxa espantosa em conjunto com a adoção generalizada de dispositivos LoRa (MAGRANI, 2018).

Os dispositivos LoRa possibilitam que os inovadores excedam os desafios antigos que vêm com o lançamento de uma solução IoT. O ecossistema que apoia o LoRa é completo, promovendo integração de ponta a ponta do silício aos serviços. Como uma plataforma aberta que atua na banda não licenciada, LoRa é flexível para diversos modelos de negócios para gerar lucratividade. O padrão LoRaWAN padronizado é interoperável, possibilitando que as soluções sejam escalonadas, agrupadas e progridam (KLAUCK, 2019).

4 CONCLUSÃO

Esta monografia teve como objetivo geral, apresentar a atuação da tecnologia LoRa no campo das telecomunicações, detalhando suas características, benefícios e inovações na área e diante do exposto, percebe-se que sua finalidade foi alcançada, uma vez que foi possível compreender a rede LoRa® e seu protocolo LoRaWAN®, bem como suas características técnicas, entender o funcionamento de uma rede LoRa, apresentar os benefícios da implantação de uma rede LoRaWAN e ainda identificar as inovações na área de telecomunicações com o uso da tecnologia LoRa.

Foi possível demonstrar que os dispositivos LoRa revolucionaram a internet das coisas, possibilitando a comunicação de dados em um longo alcance, usando muito pouca energia. Quando conectados a uma rede LoRaWAN não celular, os dispositivos LoRa acomodam uma vasta gama de aplicativos IoT, transmitindo pacotes com informações importantes. As redes LoRaWAN preenchem a lacuna tecnológica das redes celulares e baseadas em Wi-Fi que ordenam alta largura de banda ou alta potência, ou têm alcance limitado ou incapacidade de penetrar em ambientes internos profundos.

Verificou-se que enquanto as redes 5G não estão disponíveis no campo, a tecnologia LoRa é uma das boas alternativas existentes, pois tem custo menor de implementação para cobertura de áreas extensas, já que não existe necessidade de licenciamento da banda de operação. Ela ainda é excelente para atuar em dispositivos que usam baterias, por conta do baixo consumo de energia para transmitir informação. Outro fator importante é a baixa complexidade dos dispositivos de borda, de maneira a possibilitar o desenvolvimento de uma estrutura mais simples e barata para coleta de dados e automatização no campo.

Constatou-se que a tecnologia LoRa permite o desenvolvimento de diversos projetos no setor em que a quantidade de dados a serem transmitidos pelos sensores nas bordas finais da estrutura não seja muito grande. Assim, em episódios em que vídeos, imagens pesadas e outras informações necessitem ser transmitidas até o Servidor da Aplicação, talvez o LoRa ainda não seja uma solução. Mas, em situações que informações mais sucintas (textos e medições, entre outros dados) são enviadas, as redes LoRa podem ser implementadas com bom desempenho, como destacou-se neste estudo o caso de gerenciamento inteligente da rede de água, conectividade no campo, detecção de desastres naturais e monitoramento ambiental assim como localização de bens.

Como desenvolvimento futuro deste estudo propõe-se as seguintes abordagens: Implantação de um projeto utilizando equipamentos e fornecedores consolidados no uso de LoRaWAN; incorporar neste estudo, o uso da tecnologia 5G para IoT; desenvolver projetos práticos que empreguem a solução de comunicação LoRaWAN em redes de distribuição de água, conectividade no campo, detecção de desastres naturais e monitoramento ambiental ou rastreamento de bens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAZAM, M.; HUH, E. **Fog Computing and Smart Gateway Based Communication for Cloud of Things**, p. 464–470, ago. 2014.

ABEL, M. G. **Protocolo de comunicação de topologia mesh utilizando radiofrequência por modulação LoRa**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.

AGROTHINGS. **LoRa – Uma solução para a conectividade no campo**. 2019. Disponível em: < <http://agrothings.net/blog/lora-uma-solucao-para-a-conectividade-no-campo/>>. Acesso em: 11 set. 2022.

ALVES, L. H. de O. et al. **Comunicação LoRa cooperativa com codificação de rede**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2021.

ARRUDA, C. V. et al. **Análise da implantação de uma rede LoRaWAN para sistemas embarcados**. 2019.

AUGUSTIN, A. et al. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. **Sensors, Basel, Switzerland**, v. 16, n. 9, p. 1466, 09 set 2016.

BARDYN, J. P. et al. **IoT: The Era of LPWAN is starting now**. ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, p. 25-30, 2016.

BARRIQUELLO, C. H.; SOARES E SILVA, F. E.; BERNARDON, D. P.; CANHA, L. N. RAMOS, M. J. S.; PORTO D. S. **Fundamentals of Wireless Communication Link Design for Networked Robotics**. Livro - Service Robots. Editor - Antonio J. R. Neves. Capítulo 7. SN - 978-953-51-3723-8 - Editora IntechOpen – Rijeka – Croácia, 2017.

COSSINI, F. **LoRaWAN: uma rede alternativa para a Internet das Coisas**. 2016.

CUNHA, M. P. **Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz**. Dissertação - Mestrado Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Universidade Federal Fluminense. Niterói-RJ, 2021.

DA CRUZ, O. A. R.; RAMOS, D. C. Avaliação da Comunicação LoRa no Controle de um Robô Móvel. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI**. 2021.

DIAS, R. **Internet das Coisas sem mistérios**: Uma nova inteligência para os negócios. São Paulo: Netpress Books. 2016.

EGLI, P. R. **LPWAN** – Low Power Wide Area Network. 2015.
Disponível em: <http://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf>.
Acesso em: 1 set. 2022.

ERIDANI, D.; WIDIANTO, E. D.; AUGUSTINUS, R. D. O. (2019, December). Monitoring system in LoRa network architecture using smart gateway in simple LoRa protocol. In **2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)**, IEEE, p. 200-204, 2019.

FARIA, E. P. de; CAVAZOTTI, R. M. **Monitoramento de índices de umidade de solos utilizando rede de LoRa**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019.

FACCIONI FILHO, M. Internet das coisas. **Unisul Virtual**, 2016.

FORBES. **Internet of Things By The Numbers**: Market Estimates And Forecasts. 2014.

GARCIA, P. S. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. Tecnologias emergentes de conectividade na IoT: Estudo de redes LPWAN. In: **XXXV Simósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais-SBrT2017**. p. 1009-1003. 2017.

GARCIA, P. S. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de Redes LPWAN. In: **Simpósio Brasileiro De Telecomunicações E Processamento De Sinais, XXXV**. 2017, São Pedro, SP, 2017.

GEORGIU, O.; RAZA, U. Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 6, n. 2, p. 162-165, Abril 2017.

HAXHIBEQIRI, J. et al. **LoRa Scalability**: A Simulation Model Based on Interference Measurements. *Sensors*. 2017.

HELAL, A. A. et al. EstAcqua: Proposta de solução integrada de Hardware, Software e Internet das Coisas para monitoramento ambiental. In: **Anais do XLV Seminário Integrado de Software e Hardware**. SBC, 2018.

HINER, J. **The Executive's Guide to the Internet of Things**. ZDNet e TechRepublic, 2013.

HOANG, Q. L.; JUNG, W. S.; YOON, T.; YOO, D.; OH, H. A real-time LoRa protocol for industrial monitoring and control systems. **IEEE Access**, 8, 44727-44738, 2020.

JOHANN, G. **Linear chirp**. 2010.

Disponível em: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Linear-chirp.svg>>.

Acesso em: 22 set. 2022.

KAGEYAMA, M. K. G.; MENEZES, V. A. D. C. de. **Compartilhamento de recursos em redes LoRa**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

KLAUCK, K. **Redes LoRa para Internet das Coisas**. Novo Hamburgo, RS, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Sistemas de Informação) - Universidade Feevale. 2019.

LINK LAB'S. **A Comprehensive Look At Low Power, Wide Area Networks**. White Papper, 2016.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN® Specification**. v1, 2018.

MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R; TRIPATHI, S. Internet of Things (IoT): A literature review. **Journal of Computer and Communications**, v. 3, n. 05, 2015.

MAGRANI, E. **A internet das coisas**. Editora FGV, 2018.

MAGRIN, D.; CENTENARO, M.; VANGELISTA, L. **Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario**. In: 2017 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), IEEE, 2017.

MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, 2018.

MICHELETTI, J. A. **Localização e rastreamento 3D usando comunicação sem fio LoRa**. Dissertação - Mestrado em Engenharia Elétrica. Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba. Universidade Estadual Paulista. 2021.

OLIVEIRA, R. R. **Análise de desempenho do protocolo LoRa/LoRaWAN para utilização em soluções de agricultura de precisão**. 2021.

ORTIZ, F. M. et al. Caracterização de desempenho de uma rede lora em ambientes urbanos: Simulação vs. prática. In: **Anais do III Workshop de Computação Urbana**. SBC, p. 167-180. 2019.

PEREIRA, P. H. M. **Desenvolvimento de dispositivo de sensoriamento para cidades inteligentes usando o padrão LoRaWAN**. 2019.

PIRES, P. F. et al. Plataformas para a internet das coisas. **Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, 2015.

RABUSKE, M. H. B. **Estudo do Protocolo LoRaWAN e Implementação de uma Rede Privada com Nós Distribuídos**. Santa Maria, RS, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia da Computação) - Universidade Federal de Santa Maria. 2017.

SANTAELLA, L. et al. Desvelando a Internet das coisas. **Revista GEMInIS**, v. 4, n. 2, p. 19-32, 2013.

SANTOS, A. V. dos et al. **Integração entre dispositivos LoRa e servidores de aplicação utilizando o protocolo LoRaWAN**. 2021.

SANTOS, B. P. et al. **Internet das coisas: da teoria à prática**. 2016.

SANTOS JUNIOR, E. J. dos et al. **Análise do impacto de técnicas de diversidade na comunicação entre dispositivos LoRa/LoRaWAN**. 2019.

SARAVANAN, A. M.; IYER, V. **Smart water grid management using LPWAN IoT technology**. 2017 Global Internet of Things Summit (GloTS), Geneva, 2017.

SEMTECH. **AN120.22 LoRa Modulation Basics**. [S.l.], 2015.

SERAFIM, E. **Uma Estrutura de Rede Baseada em Tecnologia IoT para Atendimento Médico a Pacientes Remotos**. 2014.

SORNIN (SEMTECH), N. et al. LoRaWAN Specification. **LoRa Alliance**, Inc, v. 1.0.2, jul 2016.

TEIXEIRA, G. B.; ALMEIDA, J. V. P. de. **Rede LoRa® e protocolo LoRaWAN® aplicados na agricultura de precisão no Brasil**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2017.

VERMESAN, O.; FRIESS. P. (Eds.). **Internet of Things - From Research and Innovation to Market Deployment**. Aalborg: River Publishers, 2014.

VIEIRA, L. F. M. et al. **Analysis of Aloha Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks**. 2006.

VITAL, F.; CUNHA, M.; VIEIRA, L. IOTFlood: Uma solução baseada em internet das coisas para monitoramento de enchentes de grandes proporções em tempo real. In: **Anais do XI Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais**. SBC, 2020. p. 11-20.

WERNER, T. **Uso da tecnologia LoRaWAN para o monitoramento de dados ambientais**. 2018.

WILDAN, F. M. A.; HAMIDI, E. A. Z.; JUHANA, T. The Design of Application for Smart Home Base on LoRa. In **2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)**, IEEE, p. 1-6, 2020.

ZYRIANOFF, I. et al. Impacto de lorawan no desempenho de plataformas de iot baseadas em nuvem e névoa computacional. In: **Anais do xvii workshop em clouds e aplicações**. SBC, 2019. p. 43-56.