

UNIVERSIDADE FEEVALE  
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

ANDERSON LUIS SCHWAB

CRIAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA PROJETOS DE  
PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

Novo Hamburgo

2020

ANDERSON LUIS SCHWAB

CRIAÇÃO DE UMA REDE LORA PARA PROJETOS DE  
PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do grau de  
Bacharel em Ciência da Computação pela  
Universidade Feevale

Orientador: Vandersilvio da Silva

Novo Hamburgo

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todos os que, de alguma maneira, contribuíram para a realização desse trabalho de conclusão, em especial: Aos amigos, familiares, colegas de serviço e outras pessoas que convivem comigo diariamente, minha total gratidão. Principalmente aos meus pais e amigos mais próximos por me incentivarem e apoiarem a sempre continuar nos momentos de dificuldade, principalmente nesta etapa final. Ao meu orientador Me. Vandersilvio da Silva que esteve sempre disponível para me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho. Em geral a todos os professores da instituição por me proporcionarem o conhecimento necessário durante todo o período do curso.

## RESUMO

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos possibilitaram a criação de inúmeras ferramentas que visam facilitar a vida do ser humano. Dentre elas surge a Internet das Coisas, que abrange a facilidade de manipulação e conexão de inúmeros objetos, tais como vestíveis, eletrônicos, eletrodomésticos e até automóveis. Na maioria das vezes a rede utilizada para realizar a comunicação destes dispositivos precisa alcançar longas distâncias com baixo consumo energético. O objetivo deste trabalho é o estudo da tecnologia de comunicação LoRa, para criação de uma rede LoRa utilizando como ponto principal de comunicação um *gateway* LoRa, em um cenário específico, visando a instalação da rede com a tecnologia em uma Universidade para futuros trabalhos de pesquisa, além de determinar o alcance da rede com a utilização de apenas um *gateway*. Para criação da rede, além dos dispositivos finais Wifi ESP32, são testados dois modelos de gateways diferentes, o Dragino LG02 e o Gateway LoRaWAN da empresa Radioenge.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, tecnologia LoRa, wireless, LPWAN, *gateway*.

## **ABSTRACT**

*On the last years the technological advancements enabled the creation of countless tools which aim to facilitate the human's being's life. Amongst it comes up the Internet of Things, covering the manipulation facility and the connection of innumerable objects, such as wearables, electronics, home appliances and even cars. Mostly the network used to accomplish the communication of these devices need reaches long distances with low energy consumption. The objective of this work is a study of the LoRa communication technology, for the creation of a LoRa network using as main communication point one gateway LoRa, in a specific scenario, aiming the installation of the network with the technology in a University for future research papers, besides in addition to determining the network range using only one gateway. For network creation, beyond the Wifi ESP32 end devices, two models of different gateways are tested, the Dragino LG02 and the LoRaWAN Gateway from Radioenge.*

**Keywords:** *Internet of Things, LoRa technology, wireless, LPWAN, gateway.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Blocos básico da IoT .....	16
Figura 2 - Arquitetura de dispositivos IoT .....	16
Figura 3 - Comparação entre tecnologias wireless.....	20
Figura 4 - Comparação de pontos relevantes LPWAN. ....	21
Figura 5 - Topologia rede LPWAN.....	22
Figura 6 - Arquitetura da rede LoRa. ....	23
Figura 7 - Modo de operação Classe A. ....	24
Figura 8 - Modo de operação Classe B.....	25
Figura 9 - Modo de operação Classe C.....	26
Figura 10 - Esquema de encriptação AES-128.....	27
Figura 11 - CSS - Chirp Spread Spectrum. ....	29
Figura 12 - LoRa LG02 Gateway.....	36
Figura 13 - Heltec ESP 32 .....	37
Figura 14 - Página de configuração de Servidor IoT do Gateway Dragino LG02.....	39
Figura 15 - Configuração de Rádio Frequência Channel 1 .....	41
Figura 16 - Configuração de Rádio Frequência Channel 2 .....	42
Figura 17 - Página de registro do gateway no servidor TTN .....	43
Figura 18 - Página de status do gateway no servidor TTN .....	44
Figura 19 - Página de configuração do dispositivo ABP .....	46
Figura 20 - Página de configuração do dispositivo OTAA .....	47
Figura 21 - Chaves do código ABP.....	48
Figura 22 - Chaves do código OTAA.....	48
Figura 23 - Chaves do código OTAA.....	50
Figura 24 - Frequências de Canal AU915-928.....	51
Figura 25 - Gateway LoRaWAN Radioenge.....	54
Figura 26 - Geração ID Gateway Radioenge.....	56
Figura 27 - Geração ID Gateway Radioenge.....	56
Figura 28 - Status Gateway LoRaWAN Radioenge no servidor TTN .....	57
Figura 29 - Arquivo da configuração LMIC .....	58
Figura 30 - Log do gateway no servidor TTN com ativação ABP.....	59
Figura 31 - Log do dispositivo no servidor TTN com ativação ABP.....	59

Figura 32 - Código Decoder da Aplicação .....	60
Figura 33 - Log do gateway no servidor TTN com ativação OTAA .....	61
Figura 34 - Log servidor TTN e dispositivo ESP32 (OTAA) .....	62
Figura 35 - Mapa dos Testes de Alcance.....	64
Figura 36 - Teste de 2km de distância.....	66
Figura 37 - Teste de 7km de distância.....	67
Figura 38 - Gráfico de potência nos testes de 4 bytes .....	68
Figura 39 - Gráfico de potência nos testes de 8 bytes .....	68
Figura 40 - Pacotes perdidos nos testes de 4 bytes.....	69
Figura 41 – Pacotes perdidos nos testes de 8 bytes .....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características e grandezas da tecnologia LPWAN .....	22
Quadro 2 - Principais características dos dispositivos LoRa.....	26
Quadro 3 - Teste de Downlink Dragino .....	50
Quadro 4 - Teste de alcance (8 bytes) .....	65
Quadro 5 - Teste de alcance (4 bytes) .....	65

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Comparação entre protocolos de comunicação mais utilizados.....	17
Tabela 2 - Comparação entre os métodos de ativação ABP e OTAA.....	45
Tabela 3 - Especificações Transmissor e Receptor Gateway Radioenge.....	55
Tabela 4 - Especificações Alimentação Gateway Radioenge .....	55

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IOT	Internet of Things
LORA	Long Range
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LORAWAN	Long Range Wide Area Network
WIFI	Wireless Fidelity
ISM	Industrial, Scientific and Medical
RF	Radiofrequência
IP	Internet Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
ALOHA	Advocates of Linux Open-source Hawaii Association
CRC	Cyclic Redudancy Check
AES	Advanced Encryption Standard
MIC	Message Integrity Code
ADR	Adaptative Data Rate
SF	Spreading Factor
BW	Bandwidth
FEC	Forward Error Correction
CR	Code Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum
RSSI	Received Signal Strength Indication
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
WAN	Wide Area Network
MAC	Media Access Control
SPI	Serial Peripheral Interface

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>INTERNET DAS COISAS .....</b>	<b>15</b>
2.1	CONSTRUÇÃO E ARQUITETURA DA IOT .....	15
2.2	COMUNICAÇÃO .....	17
2.3	IMPLEMENTAÇÕES IOT .....	18
<b>3</b>	<b>REDES LORA .....</b>	<b>19</b>
3.1	LPWAN .....	19
3.2	LORA .....	23
<b>3.2.1</b>	<b>História .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Características da Rede LoRa .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Protocolo de Comunicação LoRaWAN .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Segurança .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Gateway LoRa.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Funcionamento da Rede LoRa .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Implementações da Rede LoRa .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>TRABALHOS CORRELATOS .....</b>	<b>30</b>
4.1	PERFORMANCE EVALUATION OF LORA NETWORKS IN A SMART CITY SCENARIO .....	30
4.2	DO LORA LOW-POWER WIDE-AREA NETWORKS SCALE?.....	30
4.3	A STUDY OF LORA: LONG RANGE & LOW POWER NETWORKS FOR THE INTERNET OF THINGS .....	31
4.4	REDES LORA PARA INTERNET DAS COISAS .....	31
4.5	COMPARATIVO .....	32
<b>5</b>	<b>PROPOSTA DE EXECUÇÃO .....</b>	<b>34</b>
5.1	CENÁRIO DE DESENVOLVIMENTO.....	34
5.2	CLASSIFICAÇÃO .....	34
5.3	OBJETIVO DA PROPOSTA .....	35
<b>5.3.1</b>	<b>Equipamentos.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Experimento .....</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>ESTRUTURA DA REDE LORA .....</b>	<b>38</b>
6.1	CONFIGURAÇÃO GATEWAY DRAGINO LG02.....	38

<b>6.1.1</b>	<b>Configuração de Recepção e Transmissão</b> .....	<b>40</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Modos de Operação</b> .....	<b>42</b>
6.2	CONFIGURAÇÃO SERVIDOR TTN (THE THINGS NETWORK).....	43
<b>6.2.1</b>	<b>ABP</b> .....	<b>45</b>
<b>6.2.2</b>	<b>OTAA</b> .....	<b>46</b>
6.3	CONFIGURAÇÃO HELTEC ESP32 V2 .....	47
<b>6.3.1</b>	<b>Dispositivo ABP</b> .....	<b>48</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Dispositivo OTAA</b> .....	<b>48</b>
6.4	FUNCIONAMENTO GATEWAY DRAGINO LG02 .....	49
<b>6.4.1</b>	<b>Especificações LoRaWAN</b> .....	<b>51</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Resultados dos Testes</b> .....	<b>52</b>
6.5	GATEWAY LORA RADIOENGE.....	53
<b>6.5.1</b>	<b>Especificações Técnicas</b> .....	<b>55</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Configuração do Gateway Radioenge</b> .....	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>TESTES DE COMUNICAÇÃO E ALCANCE</b> .....	<b>59</b>
7.1	TESTE DE ALCANCE DA REDE.....	62
<b>7.1.1</b>	<b>Procedimento de Teste e Resultados</b> .....	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO DE ATIVAÇÃO OTAA DA BIBLIOTECA FORNECIDA PELA EMPRESA DRAGINO</b> .....	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o aumento exponencial no número de usuários que utilizam o serviço de Internet em todo o mundo, também houve um aumento significativo na utilização de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) (MADAKAM; RAMASWAMY; TRIPATHI, 2015). Esta alta vem acompanhada de avanços tecnológicos. Estes avanços por sua vez são responsáveis pela miniaturização de componentes utilizados em placas lógicas, o que permite diminuir o custo do hardware e também o consumo de energia dos dispositivos (SERAFIM, 2014).

Segundo Cisco IBSG (2011), estima-se que a IoT teve seu surgimento entre 2008 e 2009, sendo que em 2010 a quantidade de dispositivos conectados à Internet já alcançava a marca de 12,5 bilhão, dividindo este número pela população mundial, que na época era 6,8 bilhão, totaliza-se algo em torno de 1,84 dispositivos por pessoa. Levando em conta a quantidade de pessoas que utilizavam a Internet, ao invés da população mundial, o que chega a aproximadamente 2 bilhões em 2011, o número de dispositivos conectados por pessoa tem um salto de 1,84 para 6,25. Seguindo este ritmo a previsão é que no ano de 2020 o número de dispositivos conectados chegue na marca de 50 bilhões, o que seria algo em torno de 6,58 dispositivos por pessoa.

Por sua vez MANIEWICZ (2014), afirma que o número de pessoas que possuem mais de uma tela é superior a quantidade de dispositivos IoT, mas a prospecção é de que a quantidade de dispositivos IoT se iguale por volta do ano 2050, sendo algumas das principais influências a utilização em massa de dispositivos vestíveis, além da evolução e utilização de Inteligência Artificial, o que possibilita que os dispositivos de Internet das Coisas se tornem cada vez mais inteligentes e conseqüentemente autônomos.

Segundo esta tendência, surge a tecnologia de radiofrequência LoRa (*Long Range*), bastante semelhante as tecnologias *wireless* e *bluetooth*, mas que ao contrário dessas é capaz de se comunicar através de uma rede sem fio de longo alcance. Esta tecnologia realiza a comunicação e troca informações por meio de um *gateway* ou até mesmo entre os próprios dispositivos nós da rede, é baseada em uma rede de topologia estrela, semelhante a rede celular. A principal vantagem dos dispositivos LoRa em relação a outras tecnologias semelhantes, segundo a organização LoRa Alliance (2015), é a possibilidade de alcançar grandes distâncias, na faixa de quilômetros, utilizando um consumo de energia extremamente baixo. Segundo Filho, Santin e Yang (2017), esta distância pode variar de acordo com os obstáculos

presentes, chegando a distâncias de 5 quilômetros em zonas urbanas e até 15 quilômetros em zonas rurais.

As redes LPWAN sigla para *Low Power Wide Area Network* em inglês, são as responsáveis por oferecer uma vida útil de vários anos aos dispositivos, projetadas para sensores e aplicações que necessitam enviar pequenas quantidades de dados através de longas distâncias, as principais características que possibilitam seu funcionamento são; a arquitetura, a distância de comunicação, o baixo consumo, a robustez contra as interferências e a capacidade da rede, que é basicamente a quantidade máxima de nós que a rede pode suportar (LoRa Alliance, 2015).

Tendo em vista estas características, a flexibilidade na utilização prática em diferentes cenários se torna mais umas das vantagens da rede LoRa, podendo ser utilizada em diversas áreas como na agricultura, para monitoramento das condições do ambiente, em áreas hospitalares, para monitoramento de pacientes e infraestrutura, ou até mesmo na área de logística.

Segundo Garcia e Kleinschmidt (2017), algumas das áreas que podem ser favorecidas pela utilização de redes LPWAN, é a área da indústria, para controle de medidores de equipamentos industriais, sensores de umidade e temperatura, a área relacionada a cidades inteligentes, onde pode ser utilizada para controle de semáforos, controle de irrigação e iluminação de praças e jardins, controle de vagas de estacionamento, etc, e não menos importante, mas sim uma das áreas mais estudadas atualmente em questões de dispositivos vestíveis, a área da saúde e bem estar de pessoas, para cuidado de pessoas idosas ou portadoras de necessidades especiais.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é o estudo e criação de uma rede LoRa funcional com um único *gateway* LoRa em uma Universidade, para uso em futuros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento. Objetiva-se também a medição do alcance desta rede com a utilização de apenas um *gateway*. Sendo a criação de uma rede funcional LoRa o objetivo de um dos trabalhos correlatos estudados, este identifica os pontos a serem corrigidos e alterados, para que a rede possa realizar a comunicação correta entre dispositivo final e *gateway* e entre o *gateway* e o servidor de dados, onde um dos principais pontos analisados é a comunicação do *gateway* com o servidor.

O segundo capítulo traz uma base sobre o que é Internet das Coisas e seu surgimento, além de suas principais utilidades e objetivos nos dias atuais. Trata do funcionamento das redes LPWAN, demonstrando suas principais características e diferenças em relação a outros tipos

de redes. Destaca também algumas das vantagens das redes LPWAN. Traz a história, características e funcionamento da rede LoRa, objeto de estudo deste trabalho. Além disso, complementa as principais características do protocolo de comunicação LoRaWAN, incluindo o método de segurança para transmissão de dados.

No Capítulo 3 é realizada uma análise de alguns dos principais trabalhos que realizam o estudo da tecnologia LoRa e seu protocolo de comunicação LoRaWAN, identificando as principais características em relação ao presente trabalho.

O Capítulo 4 especifica o cenário para desenvolvimento da rede LoRa e traz o procedimento metodológico, fazendo-se a classificação de acordo com os métodos utilizados no trabalho e a proposta para execução, na qual constam alguns dos dispositivos que serão utilizados.

O desenvolvimento do proposto neste trabalho se inicia no Capítulo 5, no qual consta a configuração dos dispositivos e plataformas utilizadas para criação da rede LoRa, incluindo resultados obtidos na comunicação e funcionamento dos dispositivos inicialmente propostos. Seguindo a finalização das configurações necessárias, o capítulo 6 traz os testes de comunicação dos métodos de ativação ABP (*Activation by Personalization*) e OTAA (*Over-the-Air-Activation*), além dos testes de alcance da rede LoRa criada.

Por fim, o capítulo 7 traz a conclusão referente ao estudo realizado.

## 2 INTERNET DAS COISAS

De acordo com o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) a Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) em um cenário básico, ou de baixa complexidade, pode ser definida como

uma rede que conecta unicamente e exclusivamente “Coisas” a Internet. As “Coisas” possuem sensores/atuadores e uma potencial capacidade de programação. Através da exploração de identificação única e detecção, informações sobre a “Coisa” podem ser coletadas e o estado da “Coisa” pode ser alterado de qualquer lugar, a qualquer momento, por qualquer um (MINERVA; BIRU; ROTONDI, 2015).

Segundo Lopez Research LLC (2013), a Internet da Coisas é um sistema formado por elementos do mundo físico, possuindo sensores acoplados ou em seu interior, estes mesmos elementos e sensores estão conectados a uma rede de Internet através de uma conexão, podendo esta conexão ser com fio ou sem fio. A fim de proporcionar benefícios a seus usuários, a IoT tem por objetivo conectar objetos inanimados e seres vivos, podendo variar de turbinas a gás até automóveis e utilitários domésticos, ou organismos vivos, como animais de produção, plantas e até pessoas. Outro objetivo é o de utilizar os sensores para coleta e armazenamento de dados, sendo cada um responsável por uma função específica, como monitorar localização, vibração, movimentação e temperatura, onde os dados coletados fornecerão novas informações a empresas ou pessoas.

A tecnologia IoT surgiu para tornar mais fácil e prática a vida das pessoas. Sendo um dos principais focos o de tornar os objetos inteligentes e autônomos, ou seja, a tecnologia surgiu para criar cidades inteligentes, onde os objetos do dia a dia podem tomar decisões sozinhos de acordo com sua programação, e coletar informações, as quais também podem ser utilizadas para a tomada mais correta de decisões ou apenas para armazenamento de dados.

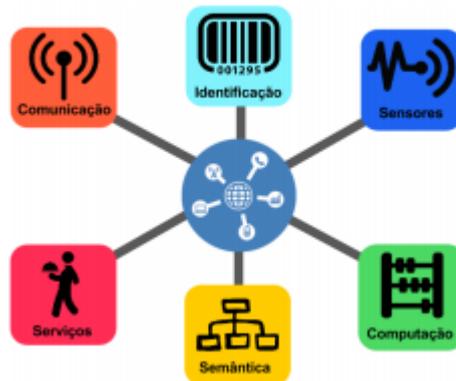
### 2.1 CONSTRUÇÃO E ARQUITETURA DA IOT

De acordo com Santos et al. (2016), a IoT é formada pela construção de blocos básicos, onde a combinação de diversas tecnologias se complementa para viabilizar a integração de todos os objetos do ambiente físico ao mundo virtual. Como também pode ser observado na Figura 1, estes são os blocos:

- Identificação
- Sensores/Atuadores

- Comunicação
- Computação
- Serviços
- Semântica

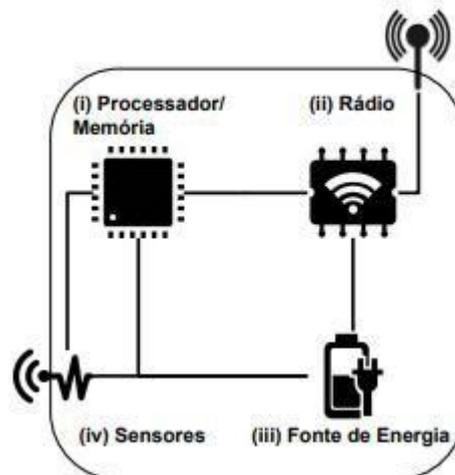
**Figura 1 - Blocos básico da IoT**



Fonte: Santos et al. (2016)

A arquitetura básica de um dispositivo IoT é formada por quatro unidades: processamento/memória, comunicação, energia e sensores/atuadores. Ambas unidades são interligadas entre si (SANTOS et al., 2016), como pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2 - Arquitetura de dispositivos IoT**



Fonte: Santos et al. (2016)

## 2.2 COMUNICAÇÃO

A comunicação utilizada nos dispositivos IoT varia de acordo com o tipo de aplicação e seus requisitos, levando em conta a mobilidade, a quantidade de dados trafegados etc. Normalmente esta comunicação é realizada através de uma rede sem fio (KLAUCK, 2019).

Segundo Klauck (2019), são alguns dos protocolos mais utilizados para realizar a comunicação de aplicações IoT, os protocolos Ethernet, Wi-Fi, Zigbee, Bluetooth, 3G/4G, Sigfox e LoRaWAN.

A utilização de dispositivos IoT acarretou novos desafios que precisam ser solucionados para tornar a utilização das aplicações mais simplificada e sustentável, principalmente pois as tecnologias de protocolos de comunicação atuais possuem uma certa dificuldade de atender estas necessidades. Alguns destes principais desafios são o consumo de energia, tendo a necessidade de protocolos capazes de maximizar a vida útil da bateria. O alcance da rede, o que também interfere diretamente no consumo de energia, devido a alguns protocolos utilizarem o alto poder de ondas de radiofrequência para alcançar longas distâncias. E não menos importante, a taxa de transferência de dados, que tem um custo mais elevado além da utilização de mais energia de acordo com a quantidade de dados transmitida, sendo assim necessário protocolos capazes de serem programados para funcionar em tempos pré-determinados, hibernando quando não utilizados, prolongando assim a vida útil da bateria.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os principais protocolos utilizados para comunicação de aplicações IoT citados neste capítulo.

**Tabela 1 - Comparação entre protocolos de comunicação mais utilizados.**

Protocolo	Alcance	Frequência	Taxa	IPv6	Topologia
Ethernet	100/2000 m	N/A	10 Gbps	Sim	Variada
Wi-Fi	50 m	2.5/5 GHz	1300 Mbps	Sim	Estrela
Bluetooth	80 m	2.4 GHz	1 Mbps	Sim	Estrela/Mesh
ZigBee	100 m	915 MHz/2.4 GHz	250 Kbps	Sim	Estrela/Mesh
3G/4G	35/200 km	1900/2100/2500 MHz	1/10 Mbps	Sim	Estrela
SigFox	10/50 km	868/902 MHz	10 - 1000 bps	-	-
LoRaWAN	2/5 km	Sub-GHz	0.3 - 50 Kbps	Sim	Estrela

**Fonte: Santos et al. (2016)**

### 2.3 IMPLEMENTAÇÕES IOT

As implementações da tecnologia IoT podem ser as mais diversas incluindo cidades inteligentes (*Smart Cities*), saúde (*Healthcare*) e casas inteligentes (*Smart Home*). Um dos elementos mais importantes para o sucesso da IoT é a padronização da tecnologia, o que trará uma heterogeneidade aos dispositivos fazendo com que o uso da IoT cresça ainda mais (SANTOS et al., 2016).

### 3 REDES LORA

Este capítulo traz os principais aspectos das redes LPWAN comparadas as principais tecnologias de comunicação sem fio utilizadas atualmente. Também demonstra as principais características presentes na tecnologia LoRa, incluindo o protocolo de comunicação LoRaWAN.

#### 3.1 LPWAN

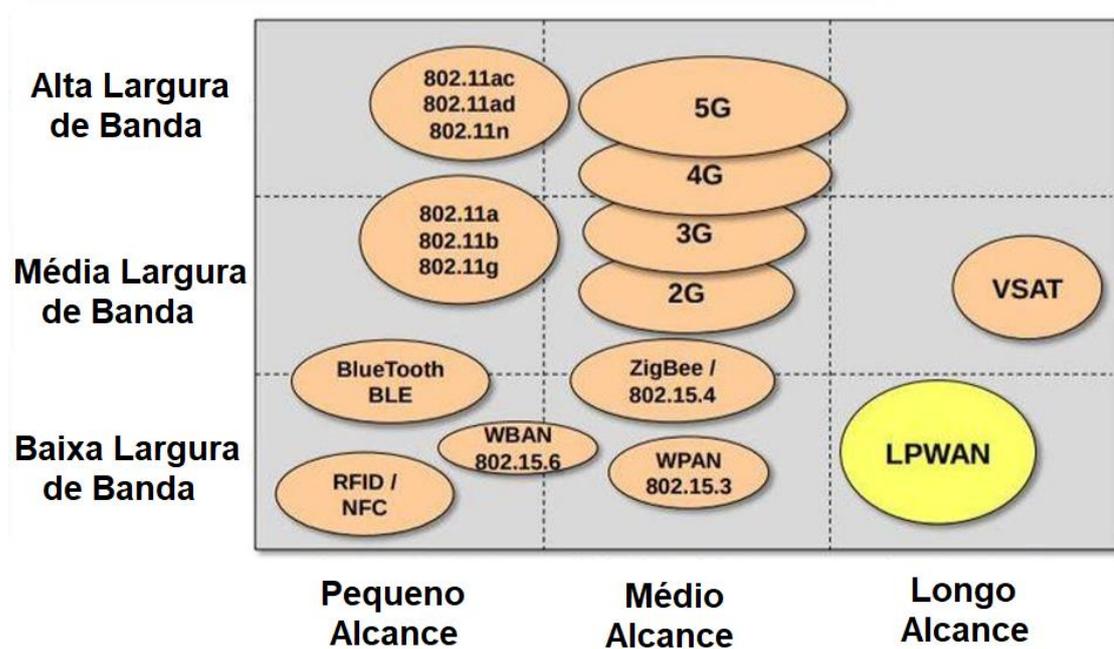
As redes LPWAN são tecnologias relativamente novas no mercado. Sendo assim, algumas destas ainda requerem alguns estudos de caso. Conhecida principalmente pelo seu longo alcance e baixo consumo de energia, a tecnologia *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) normalmente é utilizada em aplicações que necessitam se comunicar através de quilômetros de distância com taxas de transferência que podem variar de 10 bps até alguns kbps, ou ainda conectar objetos que geralmente não possuem outra solução de conectividade (BARDYN et al., 2016).

Segundo Dias (2016), o protocolo LPWAN é bastante atrativo para utilização em aplicações IoT, sendo mais direcionados a aplicações emergentes, onde as características de potência e baixa largura de banda das aplicações exigem uma baixa mobilidade e uma baixa taxa de transferência de dados.

O tipo de frequência utilizada pelas redes LPWAN varia de acordo com a região de operação, sendo algumas das mais utilizadas as frequências ISM (*Industrial Scientific and Medical*) não licenciadas, como 169, 433, 868/915 MHz e 2.4 GHz (GEORGIU; RAZA, 2017).

O uso do tipo de tecnologia *wireless* varia de acordo com os requisitos de alcance e largura de banda de cada aplicação. Uma conexão de longo alcance e baixa transferência de dados, por exemplo, um cenário típico de aplicações IoT e M2M (*Machine-to-Machine*), não recebe um suporte adequado das tecnologias existentes. É neste contexto que as tecnologias LPWAN se encaixam, como pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 - Comparação entre tecnologias wireless.

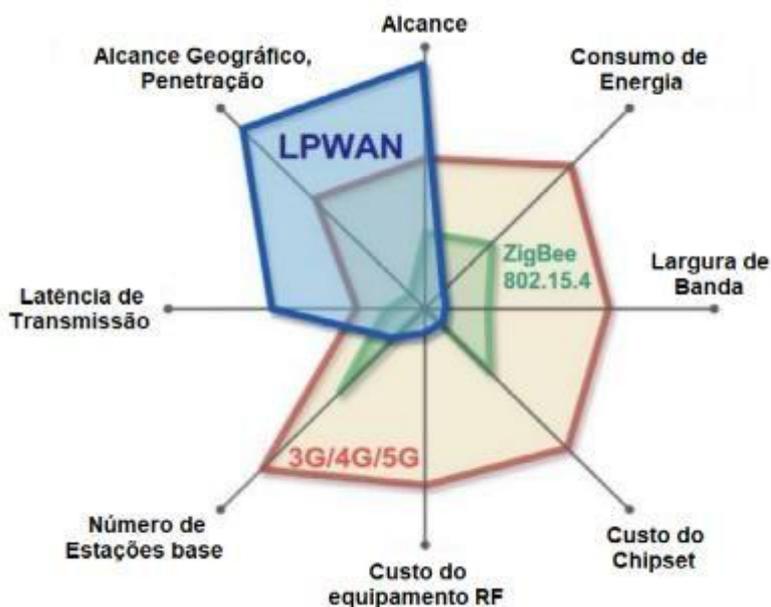


Fonte: Adaptado de Egli (2015)

Algumas outras questões podem ser levadas em consideração quando comparadas a tecnologia LPWAN com outras tecnologias como ZigBee e 3G/4G/5G. Como por exemplo o custo do mercado, que se torna quase irrelevante quando comparado com 3G/4G/5G. A quantidade de estações base necessárias para se comunicar com os dispositivos, que também é baixa se comparada com as tecnologias 3G/4G/5G e ZigBee, permitindo assim que apenas uma estação base LPWAN se comunique com inúmeros dispositivos. Além disso, a cobertura geográfica e capacidade de penetração é outro ponto relevante da tecnologia LPWAN, sendo extremamente superior a tecnologia ZigBee.

Na Figura 4 a seguir são apresentadas as comparações entre as tecnologias LPWAN, ZigBee e 3G/4G/5G de maneira gráfica.

Figura 4 - Comparação de pontos relevantes LPWAN.



Fonte: Egli (2015)

As principais características da tecnologia LPWAN, segundo (BARDYN et al, 2016) são:

- O consumo energético extremamente baixo, o que permite uma longevidade maior das baterias e exclui a troca constante das mesmas. A troca constante de baterias em um cenário com bilhões de dispositivos se tornaria algo terrível e praticamente impossível.
- O baixo custo, sendo normalmente redes de fácil instalação e necessitando o mínimo de manutenção.
- Atividade variável da rede, podendo ser configurada com ou sem o sincronismo no envio e recebimento de pacotes.
- Fácil implementação da infraestrutura da rede, podendo adicionar novos objetos com facilidade.
- Segurança na transferência de dados, sendo uma das partes da segurança o link RF (Radiofrequência) robusto contra invasões.
- Modulação em geral robusta, para situações onde possa haver uma possível obstrução, principalmente em ambientes onde a movimentação dos objetos é mais rápida.
- Da perspectiva das aplicações, os objetos conectados à rede fornecem informações que são utilizadas em uma grande variedade de serviços.

No Quadro 1 abaixo é possível observar uma relação entre as características e grandezas da tecnologia LPWAN.

**Quadro 1 - Características e grandezas da tecnologia LPWAN**

Característica	Especificação Grandeza LPWAN
Alcance	5 a 40 km em campo aberto.
Vida útil bateria	10 anos.
Latência de transmissão	Aplicações de IoT são tipicamente insensíveis à latência.
Número de estações base	Muito baixa. Estações LPWAN são capazes de servir milhares de equipamentos.
Área de cobertura	Excelentes para cobrir áreas rurais e remotas. Boas em relação a penetração em construções e seus interiores.

**Fonte: Dias (2016)**

As tecnologias de rede LPWAN normalmente utilizam a topologia estrela. Ou seja, todos dispositivos conectados à rede são conectados diretamente a um ponto de acesso. Dependendo da aplicação, para cobrir as áreas onde não há cobertura do sinal podem ser utilizados repetidores, suprimindo assim as necessidades de área de cobertura, latência e confiabilidade da rede (DIAS, 2016).

Na Figura 3 é demonstrado um modelo de comunicação básico da topologia estrela, onde vários dispositivos IoT se conectam diretamente com a estação base utilizando tecnologia LPWAN, a base é conectada diretamente a uma rede Internet (TCP/IP), sendo assim, também responsável pela tradução dos protocolos IoT, como por exemplo o MQTT (*Message Queueing Telemetry Transport*), para posteriormente fazer a transmissão dos dados para o servidor e respectivas aplicações.

**Figura 5 - Topologia rede LPWAN**



**Fonte: Egli (2015)**

## 3.2 LORA

LoRa é um tipo de rede sem fio LPWAN que faz o uso de ondas de rádio frequência para transmitir pequenas taxas de dados por longas distâncias. É a camada que possibilita realizar a comunicação entre os dispositivos da rede (KLAUCK, 2019).

### 3.2.1 História

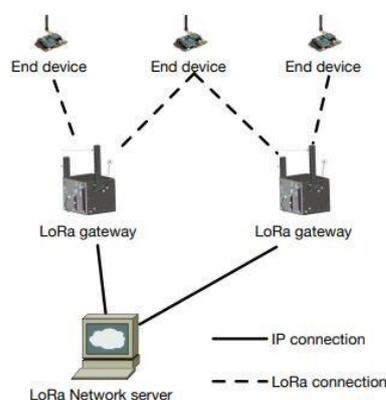
LoRa é uma tecnologia proposta e desenvolvida pela empresa Semtech Corporation e atualmente promovida pela empresa LoRa Alliance, que também definiu as camadas mais altas e a arquitetura de rede sobre as camadas físicas da tecnologia LoRa conhecidas como LoRaWAN (GEORGIU; RAZA, 2017). LoRa Alliance é uma organização sem fins lucrativos formada e movida por empresas do mercado da tecnologia que tem como missão a padronização da rede LoRa (WERNER, 2018).

### 3.2.2 Características da Rede LoRa

A rede LoRa normalmente é formada por uma topologia que utiliza uma pequena quantidade de equipamentos, sendo um deles o dispositivo LoRa responsável por receber os dados provenientes de um ou mais sensores IoT e encaminhar estas informações para o *gateway* que também possui tecnologia LoRa, este *gateway* envia as informações para os servidores de rede os quais realizam o tratamento dos dados e retornam uma resposta se houver necessidade (COSSINI, 2016).

Na Figura 6 pode ser observada a topologia formado pelos equipamentos descritos no parágrafo anterior.

**Figura 6 - Arquitetura da rede LoRa.**



**Fonte: Augustin et al. (2016)**

### 3.2.3 Protocolo de Comunicação LoRaWAN

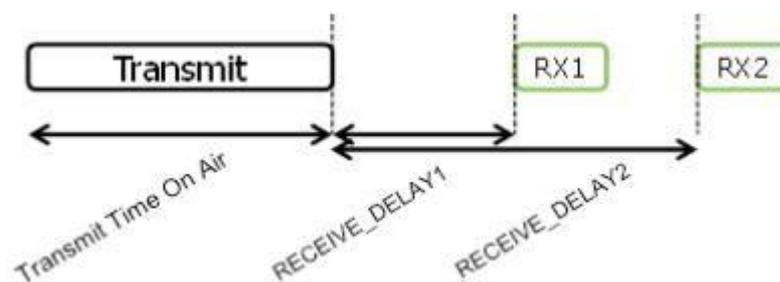
LoRaWAN é um protocolo de comunicação desenvolvido em cima da tecnologia LoRa, tendo seu principal foco a utilização em aplicações IoT. LoRaWAN é um protocolo do tipo LPWAN, desenvolvido para consumir pouca energia e enviar pequenas quantidades de dados a longas distâncias (SILVA et al., 2017).

Nas redes LoRaWAN a comunicação dos nodos com o *gateway* e vice-versa é realizada através de frequências determinadas, sendo elas: 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz (WERNER, 2018).

Para ser capaz de atender os diferentes tipos de aplicações, o LoRaWAN é dividido em três tipos de operação para os dispositivos finais (LoRa Alliance, 2015). Sendo elas classe A, B e C exemplificadas a seguir:

- Classe A:** Nesta classe a comunicação é totalmente assíncrona e sempre iniciada pelo dispositivo final. O dispositivo final pode entrar em modo de suspensão definida pela aplicação, o que proporciona uma redução no uso de energia (LoRa Alliance, 2015). Esta classe é semelhante a ALOHA (*Advocates of Linux Open-source Hawaii Association*), onde o dispositivo final pode acessar a rede mandando um *Cyclic Redundancy Check (CRC)* sempre que possuir dados para transmitir. Após a transmissão (*Uplink*) são oferecidas sempre duas janelas curtas de recepção (*Downlink*) (WERNER, 2018), permitindo uma comunicação bidirecional ou algum comando de controle.

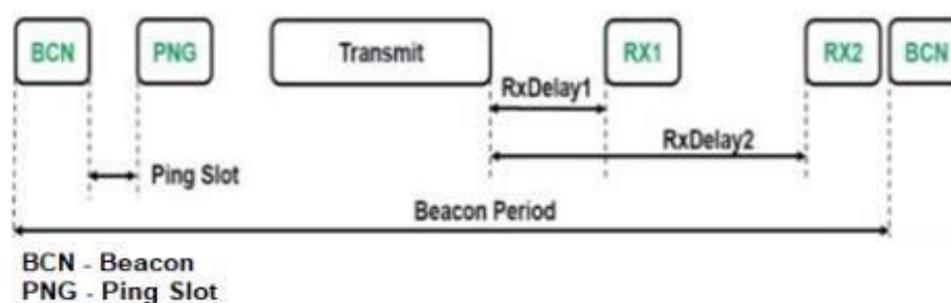
Figura 7 - Modo de operação Classe A.



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

- Classe B:** Na classe B os dispositivos possuem um modo operação semelhante ao protocolo *slotted ALOHA*<sup>1</sup>, onde a sincronização é realizada de tempos em tempos com o envio de *beacons* pelo *gateway*, através dos quais é aberta uma janela de transmissão com o dispositivo final chamada *ping-slot*. Neste momento acontece o *uplink* e logo após o *gateway* pode realizar a operação de *downlink* (WERNER, 2018). Essas transmissões podem ser programadas pela aplicação com uma latência de até 128 segundos para serem enviadas em horários específicos. Apesar desta configuração ter um consumo adicional de energia ainda continua sendo viável para aplicações alimentadas por bateria (LoRa Alliance, 2015).

Figura 8 - Modo de operação Classe B.

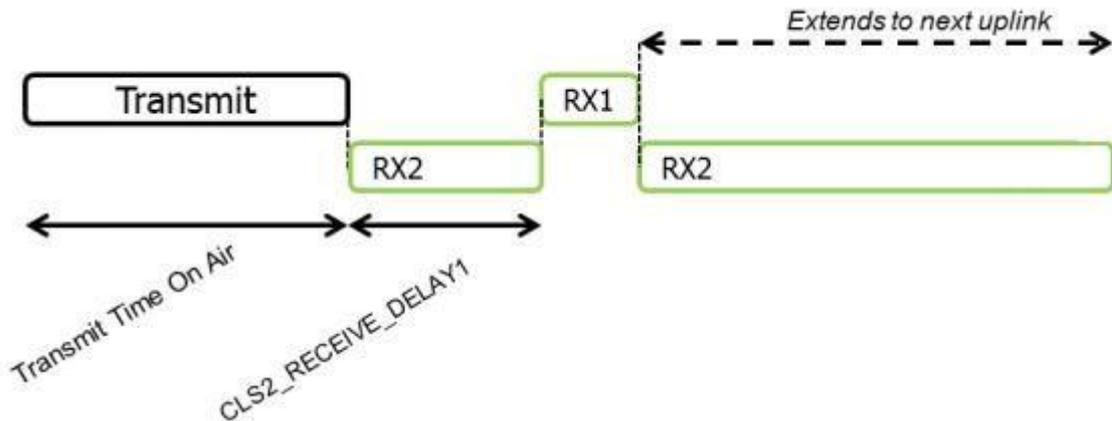


Fonte: Sornin (Semtech) et al. (2016)

- Classe C:** Nesta classe existe total liberdade de recepção de dados por parte dos dispositivos finais, a não ser que o mesmo esteja realizando uma operação *uplink*, quando então a janela de recepção é fechada. É o modo mais custoso em relação ao consumo de energia, por isso é recomendado para aplicações onde o *end-point* esteja conectado a uma fonte de energia contínua e não uma bateria (WERNER, 2018). Além de possuir a estrutura de *uplink* da classe A seguida por duas janelas de *downlink*, este é o modo que oferece menor latência para *downlink* (LoRa Alliance, 2015).

<sup>1</sup>*Slotted ALOHA* é uma versão modificada do protocolo ALOHA. No protocolo *slotted ALOHA* a transmissão é dividida em intervalos de tempos de igual comprimento e o envio de dados é realizado apenas no início de um intervalo de tempo (VIEIRA et al, 2006).

Figura 9 - Modo de operação Classe C.



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

No Quadro 2 a seguir podem ser visualizadas as principais características de cada uma das classes de uma maneira mais simplificada.

Quadro 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 qdo. Inicia comunicação?	<i>End-device</i> quando algo acontece	<i>Network server</i> pode iniciar em intervalos fixos e regulares	<i>End-devices</i> e <i>Network server</i> a qualquer momento

Fonte: Garcia e Kleinschmidt (2017)

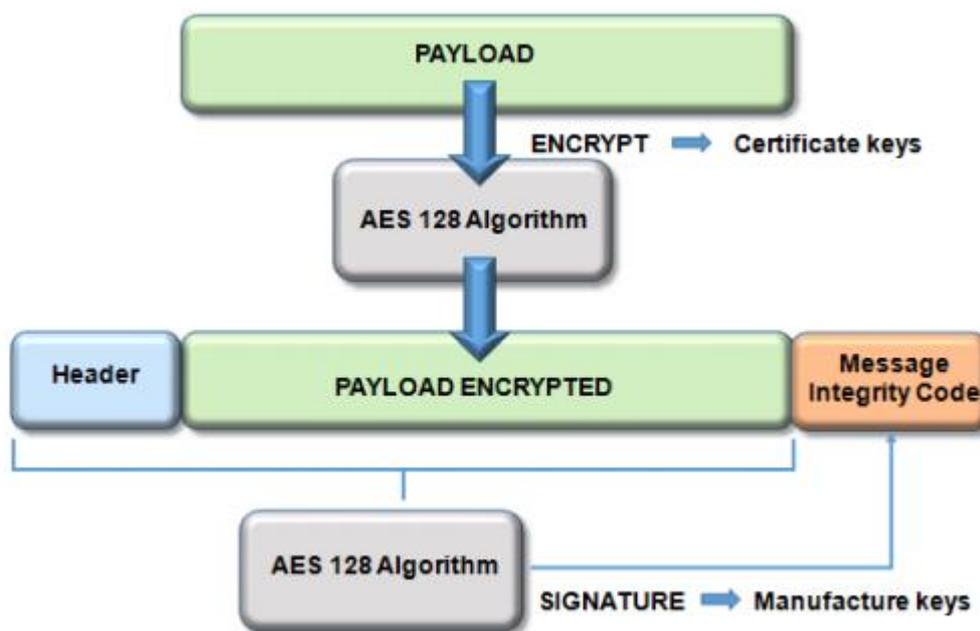
### 3.2.4 Segurança

A segurança é um dos quesitos mais importantes quando se trata de dispositivos IoT, sendo responsável pelo funcionamento ininterrupto da rede, ou seja, sem intervenções externas. LoRaWAN faz a utilização de duas camadas de segurança: uma responsável pela rede e outra para a aplicação. Enquanto a camada de rede garante a autenticidade do nodo na rede, a camada de segurança da aplicação garante que o operador da rede não tenha acesso aos dados das aplicações finais (LoRa Alliance, 2015).

A solução de rede LoRaWAN possui uma autenticação baseada em chaves de criptografia e um quadro de segurança baseado no sistema de criptografia AES-128 (*Advanced*

*Encryption Standard*). Para garantir a confidencialidade o AES-128 criptografa o quadro de segurança e após para garantir a integridade, gera um MIC (*Message Integrity Code*). Cada dispositivo final possui sua atribuição de chaves fornecidas pelos fabricantes de dispositivos ou proprietários das aplicações. O quadro de segurança do protocolo LoRaWAN onde o algoritmo AES-128 realiza a criptografia e cria o MIC (*Message Integrity Code*), pode ser visualizado na Figura 10 (SILVA et al., 2017).

**Figura 10 - Esquema de encriptação AES-128.**



Fonte: Silva et al. (2017)

### 3.2.5 Gateway LoRa

O *gateway* LoRa é o dispositivo responsável por coletar/enviar os pacotes de dados dos/para os dispositivos finais ao mesmo tempo que realiza o envio/recebimento de dados para/do servidor de rede (MAGRIN; CENTENARO; VANGELISTA, 2017).

Normalmente o *gateway* utiliza uma comunicação com taxas de transmissão maiores como Ethernet e 3G. Dentro de uma rede com tecnologia LoRa podem existir vários *gateways* LoRa, onde o mesmo pacote pode ser recebido ou encaminhado para mais de um *gateway* (AUGUSTIN et al., 2016).

### 3.2.6 Funcionamento da Rede LoRa

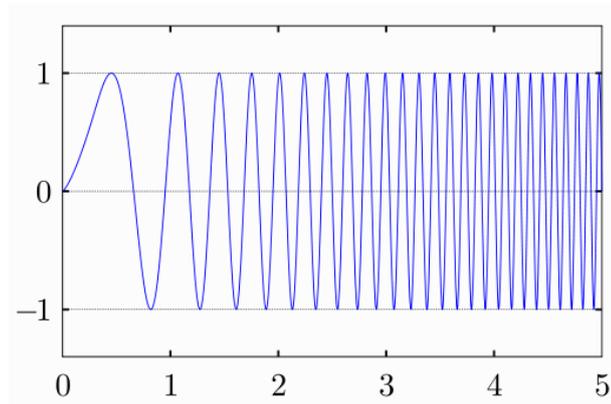
A rede LoRa possui uma modulação específica e faz uso do conceito de *Spread Spectrum* (Espalhamento Espectral), com três parâmetros de configuração que determinarão o *Bit Rate*, o máximo *Payload Size* e o *Time on-air*, influenciando no tamanho das mensagens, alcance e consumo de energia. Esta mesma parametrização permite que LoRa gerencie a taxa de dados e a potência de saída do RF em cada *end-device* (dispositivo final) através do conceito de *Adaptative Data Rate* (ADR), buscando otimização das taxas de transmissão, aumento de capacidade da rede e diminuição no consumo de energia (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017):

- **Spreading Factor (SF):** Quanto maior o SF, maior a quantidade de informações transmitidas por bit, o que também gera um ganho de processamento. Segundo Magrin, Centenaro e Vangelista (2017), o fator de espalhamento espectral pode variar de 7 a 12.
- **Bandwidth (BW):** O uso de um BW mais estreito traz 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) diz que, pode haver uma variação na banda do sinal (BW) de 125 KHz até 250 KHz.
- **Forward Error Correction (FEC / Code Rate (CR):** Realiza a regulagem da detecção e correção de erros. Segundo Werner (2018), o parâmetro *Code Rate* (CR) pode ter uma variação de 0 a 4.

Em relação ao desempenho da tecnologia LoRa se destacam duas vantagens da técnica de CSS, a robustez com relação ao desvanecimento e o efeito *Doppler* (WERNER, 2018). Segundo Fernandes et al. (2016), o efeito *Doppler* acontece, por exemplo,

quando a superfície da água é tocada, uma onda circular é criada e observamos que a crista da onda se afasta. Esta crista é chamada de frente de onda e se oscilamos o dedo regularmente uma onda contínua é produzida. Ao movimentar o dedo sobre a água, mantendo a oscilação, observamos que as frentes de onda se agrupam na frente do dedo, no sentido do movimento, enquanto no sentido oposto as frentes de onda ficam mais espaçadas. Isto acontece porque a velocidade da onda no meio de propagação não depende da velocidade da fonte. [...] o efeito Doppler [...] ocorre de forma idêntica no caso de ondas mecânicas, como as sonoras, e de ondas eletromagnéticas, como a luz visível.

Segundo Werner (2018), o funcionamento do CSS (*Chirp Spread Spectrum*) se dá através de um sinal senoidal chamado Sinal *Chirp*, ao decorrer do tempo e de acordo com o sinal de informação o sinal *Chirp* aumenta ou diminui a sua frequência.

**Figura 11 - CSS - Chirp Spread Spectrum.**

Fonte: Johann (2010)

### 3.2.7 Implementações da Rede LoRa

Algumas das aplicações para as quais pode ser considerado o uso de tecnologias LPWAN como a rede LoRa, nas quais os requisitos são baixa taxa de transmissão de dados e longo alcance da rede, podem ser citadas aplicações para cidades inteligentes 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. 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.

## 4 TRABALHOS CORRELATOS

### 4.1 PERFORMANCE EVALUATION OF LORA NETWORKS IN A SMART CITY SCENARIO

Esta pesquisa busca realizar o estudo da performance de uma rede IoT baseada na tecnologia LoRa, tendo como base um cenário típico urbano. Para realizar a implementação é utilizado o ns-3, um simulador de rede para sistemas de internet. O ns-3 é um software livre disponível para pesquisa e desenvolvimento. Diferentemente dos estudos citados, os quais trazem uma comparação técnica exaustiva da tecnologia LoRa com outras tecnologias LPWAN, este estuda a performance em um cenário típico urbano, comparando e mostrando que uma rede LoRaWAN fornece uma taxa de transferência maior do que o esquema baseado em um esquema ALOHA<sup>2</sup> básico. Além disso, mostra que a rede LoRaWAN possui uma boa escalabilidade de acordo com a quantidade de *gateways* utilizados, onde a taxa de sucesso na entrega de pacotes fica acima de 95%, quando um mesmo *gateway* trabalha com vários dispositivos na ordem de  $10^4$ , algo em torno de 15.000 dispositivos finais. Para futuros trabalhos, se planeja o estudo de outros aspectos da rede LoRa, onde se enquadram diferentes esquemas ADR (*Adaptative Data Rate*)<sup>3</sup>, diferentes estratégias de inicialização da rede, estudo de frequências e a coexistência com outras redes no mesmo espectro (MAGRIN; CENTENARO; VANGELISTA, 2017).

### 4.2 DO LORA LOW-POWER WIDE-AREA NETWORKS SCALE?

Neste trabalho Bor et al. (2016), tem como principal objetivo investigar a capacidade e limites das redes LoRa, principalmente em relação a sua escalabilidade. Para alcançar tal objetivo são realizados experimentos práticos e simulações, onde são realizadas alterações na quantidade de nodos e receptores, além de variar o tempo de transmissão e quantidade de dados enviados. A análise dos experimentos leva em consideração a quantidade de dados extraídos na comunicação e a quantidade de nodos utilizados em cada teste. Conclui-se que em um cenário típico, utilizando apenas um receptor e onde o número de nodos é igual a 120 em uma área de

---

<sup>2</sup>ALOHA é uma classe de protocolos MAC. ALOHA não evita colisões de pacotes, ou seja, toda vez que o dispositivo possuir dados para enviar, os mesmos são enviados. Quando dois dispositivos transmitirem ao mesmo tempo ocorrerá uma colisão, neste caso, é realizada uma retransmissão dos dados (VIEIRA et al, 2006).

<sup>3</sup>ADR é um recurso em que o servidor de rede gerencia e varia o data rate e a potência das transmissões realizadas pelos nodos da rede (RABUSKE, 2017).

3.8 hectares, a rede não é suficientemente eficaz para realizar futuras implementações IoT, devido à grande perda de informações. Mas também pode ser escalável se utilizados protocolos de transmissão dinâmica e múltiplos receptores, o que para se ter uma conclusão mais exata necessita de mais estudos sobre os protocolos de transmissão dinâmica e estratégias de utilização de múltiplos receptores.

#### 4.3 A STUDY OF LORA: LONG RANGE & LOW POWER NETWORKS FOR THE INTERNET OF THINGS

Augustin et al. (2016), realizam o estudo detalhado da camada física LoRa e do protocolo LoRaWAN, além de realizar uma análise de performance de ambas para propor possíveis soluções de melhoria. Realizam-se testes práticos para determinar a performance de decodificação, nos quais é utilizado um *gateway* conectado a um servidor de rede e um dispositivo final, o *gateway* permanece centralizado em um ambiente específico, enquanto o dispositivo final envia 10.000 pacotes e é movido para 5 locais diferentes. A cada alteração de local do nodo são registrados os RSSI (*Received Signal Strength Indication*) ou Indicadores de Intensidade de Sinal Recebido para posterior análise. Através do estudo é verificado que a rede LoRa fornece uma boa resistência a interferências e uma boa cobertura da rede em uma área suburbana, onde há uma densidade significativa de habitações, podendo alcançar distâncias acima de 3 km. Além disso a quantidade de dados transmitidos e o fator de espalhamento, pode ter uma grande influência no alcance da rede. Assim, conclui-se que LoRaWAN é um protocolo bastante semelhante a ALOHA, e que a performance da rede varia de acordo com a carga que é colocada sobre o link de transmissão.

#### 4.4 REDES LORA PARA INTERNET DAS COISAS

Este projeto tem por objetivo realizar o estudo da tecnologia de comunicação LoRa, identificando os principais equipamentos necessários para o funcionamento da rede, além de realizar montagem de uma rede LoRa prática juntamente com dispositivos IoT. Para isso, é realizada uma análise de outras tecnologias *wireless* juntamente com a tecnologia de comunicação LoRa, demonstrando seu funcionamento em conjunto com o protocolo LoRaWAN. Posteriormente é exemplificado o cenário que será utilizado para implementação da rede, a qual é colocada em prática utilizando os dispositivos inicialmente identificados e realizando a implementação dos códigos necessários para que os chips dos dispositivos possam

realizar a comunicação entre si e com um *gateway* LoRa. A rede criada é utilizada para realizar testes e identificar o funcionamento dos chips e do *gateway* LoRa durante a transmissão e recepção de dados, além de realizar a comparação de funcionamento entre os protocolos LoRaWAN e WiFi. Através do estudo conclui-se que a tecnologia de comunicação LoRa juntamente com o protocolo LoRaWAN e incorporada com outras tecnologias IoT, surgiram para trazer grandes benefícios, onde se destacam o longo alcance da rede e seu baixo consumo energético. Apesar dos experimentos obterem diversos cenários diferentes para implantação da tecnologia LoRa, não foi possível obter sucesso na implementação de uma rede completa pronta para IoT no cenário definido, pois não foi possível realizar o envio de informações do *gateway* para o servidor. Sendo assim, para trabalhos futuros fica como objetivo o estudo e solução dos problemas de comunicação do *gateway* com o servidor, tornando assim a rede completa para utilização com dispositivos IoT (KLAUCK, 2019).

#### 4.5 COMPARATIVO

Todos trabalhos citados anteriormente realizam a análise técnica e experimental de redes LPWAN, mais especificamente a rede LoRa e seu protocolo de comunicação LoRaWAN. São identificadas suas principais características de performance com relação a transferência de dados, escalabilidade da rede e alcance da mesma em cenários diferentes, além da comparação com outras tecnologias semelhantes utilizadas atualmente, como Zigbee, Sigfox e a própria tecnologia Wi-Fi.

Nos trabalhos apresentados nos Subcapítulos 4.1 e 4.2, é realizada uma análise mais voltada a escalabilidade da rede LoRa em relação a quantidade de dispositivos finais conectados à rede, em ambos trabalhos se verificou que a escalabilidade da rede varia de acordo com a quantidade de receptores utilizados, desta maneira quanto maior o número de receptores, mais escalável se torna a rede, permitindo uma recepção de informações de um maior número de dispositivos finais.

Já o trabalho do Subcapítulo 4.3, realiza uma análise de performance da rede utilizando o protocolo LoRaWAN em um cenário suburbano. Neste trabalho é identificado que a rede LoRa possui uma boa resistência a interferências e uma boa cobertura, mas também se verificou que a quantidade de dados e fator de espelhamento pode ter grande influência com relação ao alcance da rede.

Por fim o trabalho do Subcapítulo 4.4, realiza uma comparação entre dois tipos de tecnologias sem fio diferentes, *wireless* e LoRa, utilizando dispositivos Wifi ESP32. No

trabalho em questão é identificado que a tecnologia LoRa tem um alcance de rede bem superior à tecnologia *wireless*. Além da comparação em questão, o trabalho busca criar uma rede LoRa utilizando o *gateway* da empresa Dragino, a qual por sua vez não foi concluída, devido a uma falha de comunicação entre o *gateway* e o servidor utilizado.

O presente trabalho utiliza como base de estudo os trabalhos científicos citados e suas referências para implementação de uma rede LoRa realmente funcional, capaz de realizar comunicação entre dispositivo final, *gateway* LoRa e servidor, sendo este um dos objetivos de Klauck (2019), o qual não foi alcançado em sua totalidade devido a falha de comunicação encontrada na transmissão de dados entre *gateway* e servidor.

## 5 PROPOSTA DE EXECUÇÃO

Neste capítulo é descrito o cenário no qual a aplicação objeto deste trabalho foi criada e utilizada. Demonstra a classificação e a proposta de implementação da rede LoRa. Traz um detalhamento do experimento e identifica alguns dos principais equipamentos utilizados.

### 5.1 CENÁRIO DE DESENVOLVIMENTO

Foi realizada a criação de uma rede funcional LoRa para ser instalada futuramente em um ambiente específico, neste caso, o campus II da instituição de ensino Universidade Feevale, situada no Vale do Rio dos Sinos, mais especificamente na ERS-239, 2755 na cidade de Novo Hamburgo – RS. Inicialmente o local exato previsto para instalação do *gateway* é o prédio 11 – Verde dos cursos de Ciências Criativas e Tecnológicas situado no lado Sul do campus. De acordo com as análises realizadas durante a implementação da rede será verificado se existe a necessidade de instalação de mais *gateways* em pontos diferentes da instituição, levando em consideração que a mesma possui um total de 20 prédios.

A rede criada tem o propósito de ficar disponível para futuros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias IoT e deverá ser capaz de alcançar toda a extensão onde se compreende o campus da instituição.

### 5.2 CLASSIFICAÇÃO

Seguindo as definições de metodologia científica de Prodanov e Freitas (2013), a natureza deste trabalho se define como aplicada, pois o mesmo realiza o estudo e comparação das tecnologias de Internet das Coisas e realiza criação de uma rede com estas tecnologias dentro de um cenário específico.

Como objetivo de estudo, a pesquisa é definida como exploratória, pois é realizado o estudo de tecnologias IoT, com foco principal na tecnologia de comunicação LoRa, identificando os melhores dispositivos para a aplicação da rede e posteriormente a análise da mesma no cenário definido.

Em relação aos procedimentos técnicos, este projeto é definido como pesquisa bibliográfica e experimental. A pesquisa é bibliográfica, pois é realizado o estudo através da pesquisa de trabalhos correlatos já realizados anteriormente, identificando melhores formas de

implementação da rede LoRa, possibilitando assim o posterior estudo e comparação em relação aos resultados obtidos. A pesquisa experimental, por sua vez, se dá através da análise da rede LoRa criada a partir dos experimentos que foram realizados nos dispositivos finais LoRa e *gateway* LoRa, no decorrer de todo o estudo.

### 5.3 OBJETIVO DA PROPOSTA

O objetivo do presente trabalho é a criação de uma rede funcional com tecnologia de rede LoRa em conjunto com o protocolo de comunicação LoRaWAN, verificando a cobertura da rede com a utilização de apenas um *gateway* dentro do cenário proposto. Após a criação e testes desta rede, são apontadas as principais alterações realizadas e dificuldades encontradas para a criação da mesma, prevendo a disponibilização da rede funcional para trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de aplicações relacionadas a Internet das Coisas e semelhantes.

#### 5.3.1 Equipamentos

Para realizar a criação da rede proposta foi necessária a aquisição de alguns equipamentos com tecnologia LoRa e LoRaWAN, os quais possuem funções essenciais para a rede. Como o objetivo do presente trabalho também é a continuação de um dos trabalhos correlatos apresentados (KLAUCK, 2019), alguns dos modelos necessários também são semelhantes, estes são os dispositivos inicialmente testados e alguns destes foram substituídos de acordo com a necessidade na implementação:

- **LoRa LG02 Gateway:** Este é um modelo de *gateway indoor* de dois canais criado e desenvolvido pela empresa Dragino. Sua energia é proveniente de uma fonte de 12 volts. Suporta dispositivos LoRa das 3 classes; A, B e C, e a capacidade máxima de alcance pode variar de 5 até 10 km. Em áreas com grande densidade o alcance máximo pode chegar a 500 metros. Este *gateway* faz a conexão dos dispositivos finais LoRa com uma rede IP, podendo esta rede ser WiFi, Ethernet ou 3G/4G (a versão utilizada neste trabalho não possui módulo 3G/4G incluso) (DRAGINO, 2019). Isto permite que as informações enviadas pelos dispositivos finais através do *gateway* cheguem a um

servidor de rede para receber o tratamento necessário. A Figura abaixo demonstra o modelo LoRa LG02 Gateway.

**Figura 12 - LoRa LG02 Gateway.**



**Fonte: DRAGINO (2019)**

- **Heltec ESP32:** Este é um microcontrolador ESP32 que possui integrado um chip SX1276 com a tecnologia de comunicação LoRa. É um dispositivo da empresa Heltec, que além da tecnologia LoRa, também possui chips para comunicação WiFi e Bluetooth. Uma das características que facilita a utilização deste dispositivo é a tela Oled de 0,96 polegadas, onde podem ser visualizadas as informações enviadas e recebidas. O alcance deste dispositivo utilizando LoRa fica em torno de 3 km, o que pode variar de acordo com os obstáculos encontrados pelo sinal (Heltec, 2018). A Figura 13 ilustra o dispositivo WiFi LoRa 32.

**Figura 13 - Heltec ESP 32**

Fonte: Heltec (2018)

### 5.3.2 Experimento

Levando em consideração os resultados obtidos em Klauck (2019) relacionado ao funcionamento do *gateway* da Dragino com o servidor **The Things Network**, e com objetivo de identificar as falhas de configuração e possíveis limitações do *gateway*, além de criar uma rede funcional LoRa com o protocolo LoRaWAN, o primeiro passo foi configurar e colocar em funcionamento um Gateway Dragino, juntamente com o servidor TTN para criar uma rede de topologia estrela, onde posteriormente foram configuradas as placas ESP32 para se comunicarem com o *gateway*, funcionando como receptores e transmissores.

Após os testes de comunicação, foi identificada uma limitação que impediu o uso do *gateway* Dragino para criação da rede LoRaWAN, desta maneira foi então estudada a implementação de um novo *gateway* capaz de exercer corretamente todas as funcionalidades necessárias.

O próximo objetivo, obtido sucesso no funcionamento da rede, foi realizar os testes de alcance e performance entre *gateway* e dispositivos ESP32, obtendo assim a estrutura final e funcional de uma rede LoRa para ser utilizada em pesquisa e desenvolvimento de aplicações IoT.

## 6 ESTRUTURA DA REDE LORA

Como descrito no Capítulo 7 foi iniciado o desenvolvimento da rede LoRa utilizando a tecnologia de comunicação LoRaWAN. Inicialmente, foram realizadas as configurações básicas de comunicação entre o dispositivo ESP32, *gateway* Dragino e servidor TTN (**The Things Network**) para posteriormente seguir com os testes iniciais de comunicação e alcance da rede.

### 6.1 CONFIGURAÇÃO GATEWAY DRAGINO LG02

Após conectar o *gateway* a rede através da conexão *ethernet* da interface WAN (*Wide Area Network*) e estabelecer o acesso ao mesmo através da página web, se deu início as configurações necessárias para comunicação LoRa com os demais dispositivos. Por padrão o *gateway* já estava configurado para DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) na interface WAN, necessitando apenas a configuração dos parâmetros LoRaWAN. Como guia de configuração foi utilizado o manual do fabricante Dragino, alterando apenas algumas informações para obtenção do funcionamento correto de acordo com a região. No Dragino LG02 devem ser realizadas algumas configurações básicas para comunicação com o Servidor TTN, essas configurações foram realizadas no menu “service” na opção “LoRaWAN Gateway” e podem ser observadas na Figura 14. Além disso, foi realizada a atualização de *firmware* do dispositivo para a versão mais atual v5.3.1585192026, para garantir que o *gateway* funcione corretamente com relação a inconsistências já detectadas e corrigidas anteriormente.

Figura 14 - Página de configuração de Servidor IoT do Gateway Dragino LG02

### LoRaWAN Server Settings

IoT Service	LoRaWan/RAW forwarder ▼
Debug Level	Many verbose output ▼
Service Provider	The Things Network ▼
Server Address	meshed-router ▼
Server upstream Port	1700
Server downstream Port	1700
Gateway ID	a840411b7cc04120
Mail Address	dragino-1b7cc0@dragino.com
Latitude	22.705177
Longitude	114.243423
RadioMode	A for RX, B for TX ▼
Radio Power (Unit: dBm)	20

Fonte: O autor (2020)

Dentre as alterações realizadas estão os campos:

- **IoT Service:** Neste campo foi selecionada a opção “LoRaWAN/RAW forwarder”, que é o serviço responsável pela transmissão e recepção dos dados (DRAGINO, 2019).
- **Service Provider:** Foi selecionada a opção correspondente ao provedor de serviços que será utilizado, neste caso “**The Things Network**”.
- **Server Address:** Neste campo foi selecionada a opção referente a rota que será utilizada para que o *gateway* chegue até o servidor. O serviço da TTN possui diversos servidores de acordo com a região. No *gateway* Dragino LG02 estes servidores já estão pré-configurados e podem ser apenas selecionados. Como no Brasil a tecnologia LoRa

é recente e o *gateway* utilizado não é nacional, não existe até o momento uma opção com rotas brasileiras para ser configurada no *gateway*, sendo assim, foi selecionada a opção mais adequada de acordo com o plano de frequências do Brasil, neste caso a rota “*meshed-router*”. A opção “*meshed-router*” utiliza os roteadores da Austrália para comunicação com os servidores TTN (The Things Network, c2020).

- **Gateway ID (importante):** Neste campo é definido o ID do *gateway*, é importante ressaltar que ele é único, pois serve para identificar e diferenciar o *gateway* dos demais cadastrados na base TTN (DRAGINO, 2019), por este motivo normalmente é utilizado como ID o número MAC (*Media Access Control*) do dispositivo. Apesar disto, se for necessário pode ser utilizada qualquer numeração desde que ela obedeça às regras definidas e não esteja em utilização no servidor TTN. Neste trabalho, foi definido o ID “a840411b7cc04120”, o mesmo é diferente do número MAC do *gateway*, pois o ID correto já estava em utilização em outro usuário, ao qual não foi possível obter acesso.

Os demais campos da parte de “*LoRaWAN Server Settings*” não sofreram modificação, pois já estavam de acordo com as especificações. Dentre eles os campos “*Server upstream port*” e “*Server downstream port*”, que são relativamente a porta utilizada para envio de dados ao servidor e a porta utilizada para recebimento de dados do servidor. O parâmetro “*RadioMode*” determina o funcionamento de cada uma das antenas do *gateway*, sendo neste caso, antena A para RX (Recepção) e B para TX (Transmissão), estas antenas podem ser configuradas individualmente e trabalhar em frequências diferentes se necessário (DRAGINO, 2019), estas configurações podem ser observadas no subcapítulo 8.1.1 a seguir.

### 6.1.1 Configuração de Recepção e Transmissão

Posteriormente à configuração do servidor foi necessário realizar a configuração dos parâmetros de Rádio Frequência das antenas para recebimento e envio de dados aos dispositivos ESP32. Para isso, e de acordo com o manual da Dragino, foram configuradas as seguintes opções:

- **RadioA Frequency (Unit: Hz):** Neste campo é configurada a frequência de utilização para comunicação RX, ou seja, a frequência para receber o *uplink* do dispositivo final. Atualmente no Brasil os planos de frequências que podem ser utilizados são o AU915-928 e EU433 (LORA ALLIANCE, 2020), o *gateway* Dragino

LG02 utilizado suporta apenas as frequências de 915MHz, neste caso foi definida a frequência fixa “915000000” que está entre o range suportado de 915MHz até 928 MHz.

- **RadioA Spreading Factor:** O fator de espelhamento utilizado foi o SF7.
- **RadioA Signal Bandwidth:** A largura de banda foi definida como 125 KHz.

Figura 15 - Configuração de Rádio Frequência Channel 1

### Channel 1 Radio Settings

Radio settings for Channel 1

RadioA Frequency (Unit:Hz)	<input type="text" value="915000000"/>
RadioA Spreading Factor	<input type="text" value="SF7"/>
RadioA Coding Rate	<input type="text" value="4/5"/>
RadioA Signal Bandwidth	<input type="text" value="125 kHz"/>
RadioA Preamble Length	<input type="text" value="8"/> ⓘ Length range: 6 ~ 65536
RadioA LoRa Sync Word	<input type="text" value="52"/> ⓘ Value 52(0x34) for LoRaWAN

Fonte: O autor (2020)

O *gateway* Dragino LG02 possui duas antenas, ou seja, dois canais LoRa independentes o que possibilita uma comunicação full-duplex. Nesta configuração o “*Channel 1*” apenas recebe dados, enquanto o “*Channel 2*” permite o envio e recebimento de dados:

- **Channel 1:** O “*Channel 1*” recebe os pacotes LoRa, mas a transmissão é realizada através da Interface LoRa do “*Channel 2*”.
- **Channel 2:** Enquanto o “*Channel 2*” recebe os pacotes LoRa e também transmite.

Seguindo este padrão, também se faz necessária a configuração do “*Channel 2*”, o qual é diferenciado apenas na Frequência e largura de banda se comparado ao “*Channel 1*”, como pode ser observado na imagem a seguir.

Figura 16 - Configuração de Rádio Frequência Channel 2

### Channel 2 Radio Settings

Radio settings for Channel 2

RadioB Frequency (Unit:Hz)	<input type="text" value="923300000"/>
RadioB Spreading Factor	<input type="text" value="SF12"/>
RadioB Coding Rate	<input type="text" value="4/5"/>
RadioB Signal Bandwidth	<input type="text" value="500 kHz"/>
RadioB Preamble Length	<input type="text" value="8"/> <small>Length range: 6 ~ 65536</small>
RadioB LoRa Sync Word	<input type="text" value="52"/> <small>Value 52(0x34) for LoRaWAN</small>

Fonte: O autor (2020)

Ambos valores definidos nas configurações do *RadioA* e *RadioB* foram realizadas de acordo com as especificações da LoRa Alliance. Estas especificações podem ser encontradas no subcapítulo 8.4.1.

### 6.1.2 Modos de Operação

O *gateway* Dragino LG02 pode ser usado para criar soluções IoT *Wireless* de baixo custo, podendo suportar na faixa de 50 a 300 dispositivos sensores. Ao todo, tirando o modo LoRaWAN, o modelo LG02 utilizado neste trabalho tem suporte para quatro diferentes modos de funcionamento (DRAGINO, 2019).

- **Repetidor LoRa:** Este modo é utilizado para realizar a repetição do sinal transmitido por outro *gateway*, possibilitando assim que a rede alcance maiores distâncias.
- **Modo MQTT:** Neste modo o envio de dados do *gateway* até o servidor IoT é realizado via internet através do protocolo MQTT.
- **TCP/IP Client:** Diferente do modo MQTT, o modo TCP/IP Client realiza o envio dos dados do *gateway* até o servidor através do protocolo TCP/IP.

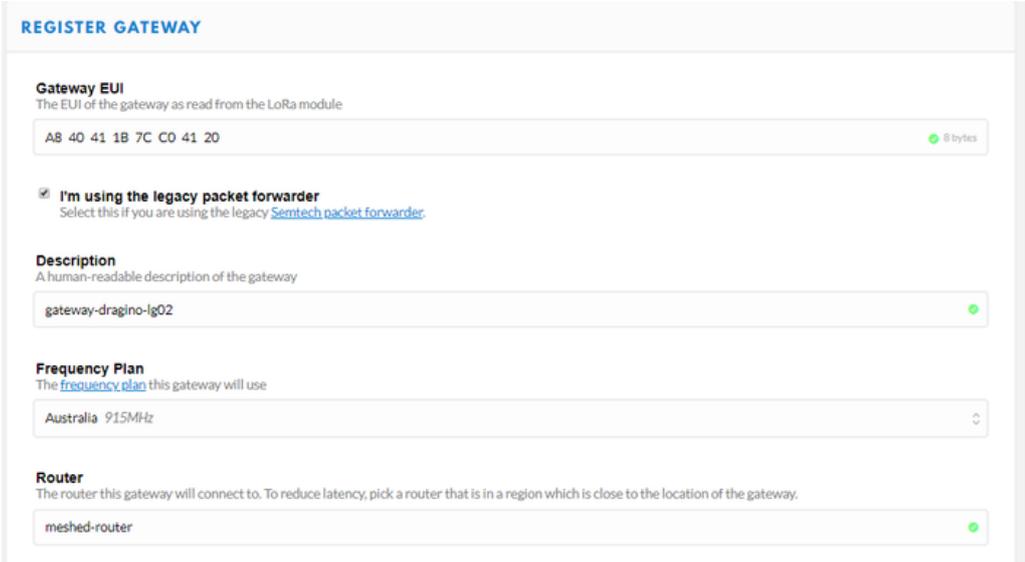
- **TCP/IP Server:** Por fim, o modo TCP/IP Server permite que uma aplicação externa se conecte ao *gateway* Dragino e busque os dados recebidos através do protocolo LoRa (DRAGINO TECHNOLOGY CO., LIMITED, [s.d.]).

## 6.2 CONFIGURAÇÃO SERVIDOR TTN (THE THINGS NETWORK)

Além de configurar o *gateway* para receber e transmitir dados, foi necessário realizar a configuração do servidor TTN, onde os dados transmitidos serão recebidos e posteriormente decodificados para a aplicação.

Após realizado o cadastro no site da The Things Network, são apresentadas duas opções sendo elas: "Aplicações" e "Gateways". Seguindo a manual Dragino inicialmente foi realizado o registro do *gateway*, para isso foi selecionada a opção "Gateways" e posteriormente registrar, o que leva até a página de configuração e registro do *gateway* a qual pode ser visualizada na Figura 17 abaixo.

**Figura 17 - Página de registro do gateway no servidor TTN**



The screenshot shows the "REGISTER GATEWAY" form on the TTN website. It includes the following fields and options:

- Gateway EUI:** A text input field containing "AB 40 41 1B 7C C0 41 20" with a "8 bytes" indicator.
- Legacy Packet Forwarder:** A checked checkbox labeled "I'm using the legacy packet forwarder" with a link to "Semtech packet forwarder".
- Description:** A text input field containing "gateway-dragino-lg02".
- Frequency Plan:** A dropdown menu showing "Australia 915MHz".
- Router:** A text input field containing "meshed-router".

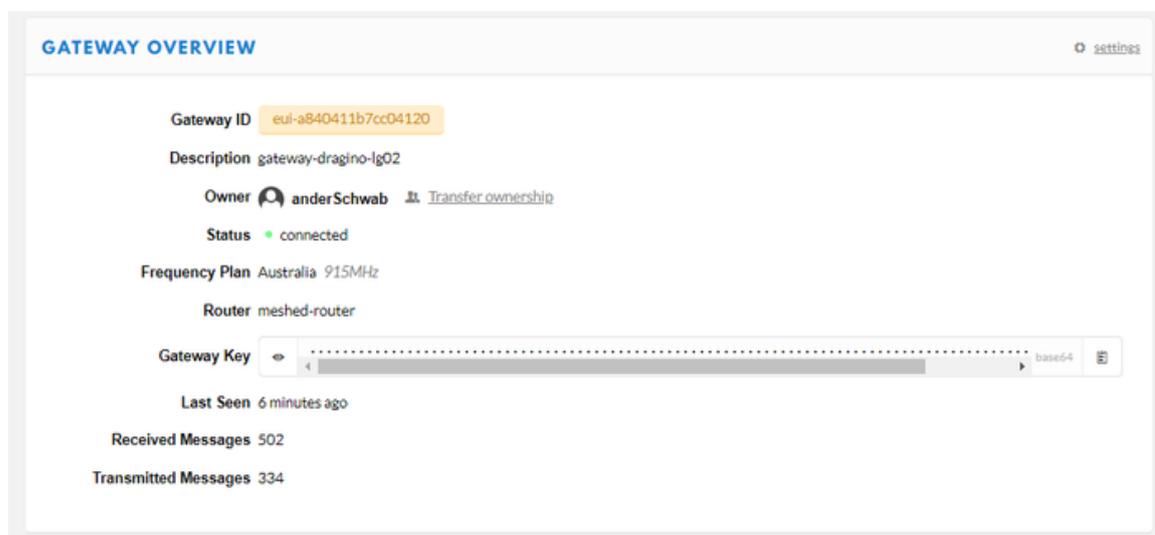
**Fonte: O autor (2020)**

No campo "Gateway EUI", foi utilizado o ID configurado no *gateway* conforme Figura 14 e selecionada a opção "I'm using the legacy packet forwarder", o que muda o ID para formato de 8 bytes. No parâmetro "Description" foi definido um nome para identificar o *gateway*. O campo "Frequency Plan" define o plano de frequências que será utilizado pelo *gateway*, atualmente no Brasil pode ser utilizado o plano AU915-928 e EU433 (LORA ALLIANCE, 2020). Neste caso foi selecionado o plano AU915-928 que é o mesmo utilizado

na Austrália, incluindo a rota “*meshed-router*” que será utilizada e que foi definida na opção “*Router*”.

Após realizada a configuração do *gateway* no servidor TTN utilizando os parâmetros corretos foi possível verificar que a comunicação do *gateway* com o servidor estava funcionando corretamente, como pode ser comprovado pela Figura 18, que mostra o *gateway* com status conectado.

**Figura 18 - Página de status do gateway no servidor TTN**



**Fonte: O autor (2020)**

Para que os dados enviados possam trafegar pela rede LoRaWAN, serem recebidos no servidor TTN e posteriormente decodificados, além da criação de um *gateway*, seguindo as instruções do manual Dragino também se faz necessária a criação de uma aplicação. Esta configuração também foi realizada através do console acessando a opção Aplicações, adicionar aplicação. Foi preenchido o campo “*Application ID*” que é o nome utilizado para identificação da aplicação e inserida uma descrição sobre a aplicação e seu objetivo. Após a criação é gerada automaticamente a chave de 64 *bits* chamada AppEUI, a qual é utilizada nos passos seguintes.

Dentre as configurações que precisaram ser realizadas para o recebimento de dados enviados dos dispositivos finais até o servidor TTN, também se fez necessária a criação de um dispositivo. Este dispositivo pode ser dividido em dois métodos de ativação, ABP e OTAA. O dispositivo é vinculado a chave da aplicação AppEUI durante seu registro, e após é gerada uma nova chave única, também de 64 bits, chamada DevEUI. Em conjunto, as chaves AppEUI e DevEUI permitem que o dispositivo seja identificado durante a ativação e seja gerado para o

mesmo um endereço de 32 bits denominado DevAddr, este é utilizado para identificação e roteamento dos *uplinks* e *downlinks* (RABUSKE, 2017).

A Tabela 2 a seguir demonstra as principais características e diferenças entre os métodos de ativação ABP e OTAA, incluindo o tipo de ativação, as chaves principais utilizadas nos dispositivos finais e as chaves utilizadas para identificação e vinculação de cada método de ativação dentro do servidor The Things Network.

**Tabela 2 - Comparação entre os métodos de ativação ABP e OTAA.**

	ABP	OTAA
Ativação	Manual	Remota
Device Keys	NwkSKey, AppSKey e DevAddr	DevEUI, AppEUI e AppKey
Keys	DevEUI e AppEUI	DevAddr, NwkSKey e AppSKey
Características	Simples, mas mais trabalhoso	Mais seguro, Chaves renovadas a cada ativação

**Fonte: O autor (2020)**

### 6.2.1 ABP

ABP é a sigla do inglês para *Activation by Personalization*, este é o método de ativação simplificado e mais rápido, mas em compensação é o menos seguro. No ABP os IDs e chaves são personalizadas (SEMTECH CORPORATION, 2019) e consiste em realizar a ativação manualmente, gerando as chaves de criptografia (NwkSKey e AppSKey) no servidor da aplicação e inserindo-as manualmente no dispositivo, junto com o DevAddr, DevEUI e AppEUI ao qual estão vinculados. Apesar de ser mais simples, em redes maiores, este método acaba sendo mais trabalhoso devido a necessidade de configuração manual em cada dispositivo (RABUSKE, 2017).

**Figura 19 - Página de configuração do dispositivo ABP**

**DEVICE OVERVIEW**

Application ID lorawan\_feevale

Device ID esp32\_node\_abp

Activation Method ABP

Device EUI <> 00 EF 4D D5 30 90 4F 66

Application EUI <> 70 B3 D5 7E D0 02 D0 A4

Device Address <> 26 03 1B 02

Network Session Key <> .....

App Session Key <> .....

Fonte: O autor (2020)

## 6.2.2 OTAA

OTAA é a sigla do inglês para *Over-the-Air-Activation*, neste método é utilizado o processo de *join*, neste processo são gerados automaticamente os parâmetros de provisionamento do dispositivo. O método OTAA é o mais seguro, além de ser capaz de armazenar múltiplas “identidades” o que possibilita a troca dinâmica e segura entre redes e operadoras durante seu tempo de vida (SEMTECH CORPORATION, 2019). No método OTAA deve ser gerado o DevEUI, semelhante ao método ABP, e realizada inserção do mesmo no dispositivo, juntamente com o AppEUI, que é o identificador único do *Join Server*, e a chave AppKey, que corresponde a aplicação.

Diferente de ABP, no método OTAA, tanto o DevAddr quanto as chaves de criptografia (NwkSKey e AppSKey) são geradas no processo de ativação remota do dispositivo, permitindo assim que as chaves de segurança sejam renovadas regularmente a cada nova ativação, mesmo que o AppKey permaneça o mesmo (RABUSKE, 2017).

**Figura 20 - Página de configuração do dispositivo OTAA**

**DEVICE OVERVIEW**

Application ID lorawan\_feevale

Device ID esp32\_node\_otaa

Activation Method OTAA

Device EUI <> || 00 CA 41 63 C3 FD 75 2A ||

Application EUI <> || 70 B3 D5 7E D0 02 D0 A4 ||

App Key <> || ⊗ ..... ||

Device Address <> || 26 03 2D 01 ||

Network Session Key <> || ⊗ ..... ||

App Session Key <> || ⊗ ..... ||

**Fonte: O autor (2020)**

### 6.3 CONFIGURAÇÃO HELTEC ESP32 V2

Para realizar a o desenvolvimento do código responsável pela comunicação LoRa do dispositivo Heltec ESP32 v2 foi utilizado o *software* Arduino IDE versão 1.8.33 para Windows 10. O programa em questão é fornecido pela empresa Arduino LCC, sendo *open-source* e desenvolvido em linguagem de programação Java, é um dos mais populares softwares de desenvolvimento para projetos IoT e permite que seja utilizado em qualquer placa Arduino, incluindo as placas ESP32 utilizadas neste projeto (ARDUINO, c2020).

Dentre as configurações do *software* Arduino IDE, algumas são necessárias para realizar a comunicação com a placa ESP32, sendo a principal no menu ferramentas, onde foi selecionada a placa Heltec ESP32 v2 o que permite que o *software* trabalhe de acordo com as limitações da placa. A comunicação entre o computador e placa ESP32 foi realizada através de uma conexão USB, sendo assim, para que a comunicação funcione corretamente foi necessária a instalação do driver que permite a conversão de protocolo USB para protocolo serial.

Para realizar o desenvolvimento do código responsável pela comunicação do dispositivo, foi necessária a utilização da biblioteca Arduino-lmic disponível na plataforma GitHub (<https://github.com/dragino/arduino-lmic>) e que é fornecida pela fabricante Dragino. Esta biblioteca é responsável pela parametrização do chip LoRa e já disponibiliza exemplos de códigos para ativação ABP e OTAA o que facilita o processo de desenvolvimento do código Arduino.

### 6.3.1 Dispositivo ABP

Para realizar a configuração do dispositivo de maneira que ele funcione corretamente no método de ativação ABP, são utilizadas as chaves NwkSKey, AppSKey e DevAddr todas no formato MSB (*Most Significant Bit*). NwkSKey e AppKey são formadas por 16 *bytes*, sendo a NwkSKey a chave para acesso à rede e a AppSKey a chave que permite acesso a aplicação. Já a chave DevAddr faz referência ao dispositivo criado no servidor TTN e é formada por um conjunto de 8 *bytes* (KLAUCK, 2019).

**Figura 21 - Chaves do código ABP**

```
// Chave na sequência MSB (Most Significant Bit)
static const PROGMEM ul_t NWKSEY[16] = { 0x0F, 0x95, 0x7D, 0x28, 0xE0, 0x0D, 0x76, 0xCE, 0x14, 0x1D, 0xD7, 0xC7, 0xF2, 0xEC, 0x8E, 0x99 };

// Chave na sequência MSB (Most Significant Bit)
static const ul_t PROGMEM APPSEY[16] = { 0xD7, 0xF9, 0x33, 0x51, 0xD5, 0x2D, 0x0D, 0xDD, 0xA5, 0x40, 0x28, 0x27, 0xE7, 0x62, 0xC3, 0x55 };

// Chave na sequência MSB (Most Significant Bit)
static const u4_t DEVADDR = 0x26031B02 ;
```

**Fonte: O autor (2020)**

### 6.3.2 Dispositivo OTAA

Para configuração do dispositivo em OTAA, foram utilizadas as chaves fornecidas pelo serviço TTN. Neste método são utilizadas as chaves DevEUI, AppEUI e AppSKey. Para que a comunicação funcione as chaves DevEUI e AppEUI devem estar no formato LSB (*Least Significant Bit*), ou seja, na ordem do bit menos significativo para o bit mais significativo. Já a chave AppSKey, deve se manter no formato MSB (*Most Significant Bit*), ou seja, na ordem do bit mais significativo para o bit menos significativo. Outra maneira de identificar a ordem das chaves, seria LSB, a ordem do bit mais à direita para o bit mais à esquerda, e para MSB, a ordem do bit mais à esquerda para o bit mais à direita (KLAUCK, 2019).

**Figura 22 - Chaves do código OTAA**

```
// Chave na sequência LSB (Least Significant Bit)
static const ul_t PROGMEM APPEUI[8]={ 0xA4, 0xD0, 0x02, 0xD0, 0x7E, 0xD5, 0xB3, 0x70 };
void os_getArtEui (ul_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8);}

// Chave na sequência LSB (Least Significant Bit)
static const ul_t PROGMEM DEVEUI[8]={ 0x2A, 0x75, 0xFD, 0xC3, 0x63, 0x41, 0xCA, 0x00 };
void os_getDevEui (ul_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);}

// Chave na sequência MSB (Most Significant Bit)
static const ul_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0xE1, 0xB2, 0xF6, 0x30, 0x24, 0xF7, 0x38, 0x69, 0xB0, 0x13, 0x59, 0x40, 0xDF, 0x7B, 0xF9, 0x79 };
void os_getDevKey (ul_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16);}
```

**Fonte: O autor (2020)**

#### 6.4 FUNCIONAMENTO GATEWAY DRAGINO LG02

Conforme planejado inicialmente, a comunicação da rede foi realizada através de um dispositivo *gateway* Dragino LG02, onde então foram realizados testes de comunicação OTAA e ABP entre a placa ESP32 e *gateway*. De acordo com os resultados obtidos nos testes, além de informações do manual do equipamento e fórum da TTN, foi possível identificar que o *gateway* escolhido possui uma limitação de funcionamento com o protocolo LoRaWAN, fazendo com que as ativações, transmissão e recepção de dados entre ESP32 e *gateway* não funcionem de forma completa.

Na ativação OTAA, por exemplo, inicialmente é realizada uma requisição do dispositivo final (*Join Request*) ao servidor TTN e posteriormente uma resposta do servidor TTN ao dispositivo final de acordo com as informações de chave e aplicação recebidas. No caso em questão, a requisição do nodo é enviada ao *gateway* e recebida posteriormente no servidor TTN, após o servidor realiza o envio da resposta (*Join Accept*), a qual é recebida pelo *gateway*, mas não é encaminhada pelo *gateway* até o dispositivo final.

Em análise foi verificado que devido a um tipo de falha no *gateway* as informações que deviam ser enviadas até o dispositivo final estavam sendo transmitidas com um fator de espelhamento diferente do inicialmente configurado conforme Figura 16, impedindo assim o *join* do dispositivo na rede. Após alterações e testes foi identificado que isto acontece pois de alguma maneira o *gateway* não identifica o fator de espelhamento inicialmente configurado.

Para que o funcionamento ocorresse conforme desejado, primeiramente foi necessário configurar o fator de espelhamento desejado e gravação do mesmo no *gateway*. Após, ainda nas configurações do canal, foi alterado o fator de espelhamento para um diferente do desejado e novamente realizada a gravação no dispositivo.

Posterior a esta alteração, foi possível visualizar a ativação bem-sucedida do dispositivo final no servidor TTN além do envio de pacotes de dados. Concluindo assim que a falha identificada na comunicação da rede se deve a um *bug* presente no sistema do *gateway* Dragino LG02.

Para a conclusão, foram realizados testes alternando o *Spreading Factor* no dispositivo final e *gateway* e analisado seu funcionamento com relação ao *downlink*, de acordo com quadro abaixo:

**Quadro 3 - Teste de Downlink Dragino**

		SF Downlink Dispositivo Final					
		SF12	SF11	SF10	SF9	SF8	SF7
SF Downlink Gateway	SF6	OK	--	--	--	--	--
	SF7	OK	--	--	--	--	--
	SF8	OK	--	--	--	--	--
	SF9	OK	--	--	--	--	--
	SF10	OK	--	--	--	--	--
	SF11	--	--	--	--	--	--
	SF12	--	--	--	--	--	--

Fonte: O autor (2020)

Nos testes realizados obteve-se êxito na comunicação utilizando apenas o SF12 no dispositivo final, isto desde que fossem configurados no *gateway* os Fatores de Espelhamento SF6, SF7, SF8, SF9 e SF10. Além disto, nos testes pode se verificar que a frequência utilizada para *downlink* é definida automaticamente pelo servidor TTN de acordo com a rota escolhida no *gateway* Dragino. Sendo assim, independente da configuração de SF e frequência de transmissão utilizada no dispositivo final e *gateway*, os parâmetros de *downlink* retornados pelo servidor TTN sempre se mantiveram os mesmos, neste caso; Frequência: 923.3 MHz, *Spreading Factor*: 7 e *Data Rate*: 500, conforme mostra Figura 22 a seguir.

**Figura 23 - Chaves do código OTAA**

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt.	
14:46:41	923.3	lor	4/5	SF 12 BW 500	329.7	5	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 22 bytes
14:46:40	916.4	lor	4/5	SF 7 BW 125	66.8	5	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 28 bytes
14:45:39	923.3	lor	4/5	SF 12 BW 500	329.7	4	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 22 bytes
14:45:38	916.4	lor	4/5	SF 7 BW 125	66.8	4	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 28 bytes
14:44:36	923.3	lor	4/5	SF 12 BW 500	329.7	3	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 22 bytes
14:44:35	916.4	lor	4/5	SF 7 BW 125	61.7	3	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 26 bytes
14:43:33	923.3	lor	4/5	SF 12 BW 500	329.7	2	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 22 bytes
14:43:32	916.4	lor	4/5	SF 7 BW 125	66.8	2	dev addr: 26 03 26 A9 payload size: 28 bytes

Fonte: O autor (2020)

Atualmente já existe uma quantidade considerável de bibliotecas “*lmic*” *open-source* disponíveis na plataforma GitHub e que podem ser utilizadas para a comunicação LoRa. Tendo em vista esta disponibilidade, foram realizados novos testes utilizando bibliotecas diferentes.

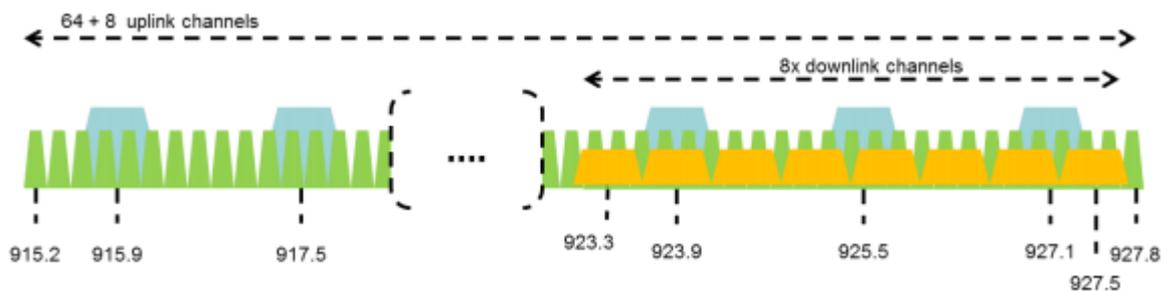
Nestes testes não foi possível obter êxito na comunicação entre o *gateway* e dispositivo ESP32, pois em grande parte dos testes o *gateway* sequer recebeu a transmissão do ESP32. Este resultado se deve a construção das bibliotecas testadas, levando em consideração que ambas seguem as especificações LoRaWAN definidas em LORA ALLIANCE (c2020), impedindo assim que sejam configuradas no dispositivo ESP32 frequências fixas para transmissão e recepção, diferente da biblioteca “lmic” adaptada e disponibilizada pela empresa Dragino.

#### 6.4.1 Especificações LoRaWAN

De acordo com LORA ALLIANCE (c2020), para realizar a comunicação entre *gateway* e dispositivos finais, devem ser seguidas algumas recomendações de acordo com o Plano de Frequências utilizado. No caso do Brasil, seguindo as especificações da Resolução n° 680 BRASIL (2017), o plano a ser utilizado é o AU915, cuja banda ISM se estende do espectro de 915 a 928MHz e deve seguir a seguinte divisão de planos de canais:

- **Upstream:** 64 canais numerados de 0 a 63 utilizando Largura de Banda LoRa de 125 KHz e variando de DR0 até DR5, usando taxa de codificação 4/5, começando em 915.2 MHz e incrementando linearmente 200 KHz até chegar em 927.8 MHz.
- **Upstream:** 8 canais numerados de 64 a 71 utilizando Largura de Banda LoRa de 500 KHz em DR6, começando em 915.9 MHz e incrementando linearmente 1.6 MHz até chegar em 927.1 MHz.
- **Downstream:** 8 canais numerados de 0 a 7 utilizando Largura de Banda LoRa de 500 KHz em DR8 até DR13, começando em 923.3 MHz e incrementando linearmente 600 KHz até chegar em 927.5 MHz.

Figura 24 - Frequências de Canal AU915-928



Fonte: LORA ALLIANCE (c2020)

Para utilização de ativação OTAA (*Over-The-Air Activation*), o dispositivo final deve realizar o *Join-Request* aleatoriamente com canais de 125 KHz entre os 64 canais definidos usando DR2 e com o canal de 500 KHz entre os 8 canais definidos usando DR6. A cada nova transmissão o canal deve ser alterado.

Para rápida aquisição de rede em cenários onde é utilizado um *gateway* com plano de canais misto, o dispositivo deve usar uma sequência de seleção aleatória de canal que analise com eficiência os 8 grupos de 8 canais de 125 KHz, seguido de uma sondagem de um canal de 500 KHz a cada passagem.

A cada passagem não pode ser selecionado um canal utilizado em uma passagem anterior, até que o *Join-Request* seja transmitido em cada canal, após isto o processo pode ser reiniciado.

O exemplo a seguir demonstra como deve ser realizado o processo de seleção do canal:

- **Primeira passagem:** Canal aleatório de [0-7], seguido por [8-15] ... [56-63], por fim 64.
- **Segunda passagem:** Canal aleatório de [0-7], seguido por [8-15] ... [56-63], por fim 65.
- **Terceira passagem:** Canal aleatório de [0-7], seguido por [8-15] ... [56-63], por fim 71.

Em dispositivos personalizados, após uma redefinição todos os 72 canais devem ser ativados, além de utilizar os canais para os quais a taxa de dados padrão do dispositivo é válida. A taxa de dados padrão do *Join-Request* deve ser DR2 (SF10 / 125 KHz), isso garante que os dispositivos finais sejam compatíveis com a limitação do tempo de espera de 400 ms até que o limite real de tempo de permanência seja notificado ao dispositivo final pelo servidor de rede.

#### 6.4.2 Resultados dos Testes

Além das inconsistências encontradas nos testes e descritas no início deste capítulo, de acordo com Dragino (2020), o dispositivo *gateway* LoRa da Dragino suporta apenas uma frequência LoRaWAN para o *uplink* e uma para *downlink*, desta maneira o dispositivo final que faz uso de múltiplas frequências, deve ser configurado com uma frequência fixa para correto funcionamento com o *gateway*.

Esta limitação encontrada no *gateway* Dragino LG02 impede o correto funcionamento nos processos de ativação OTAA (*Over-The-Air-Activation*) e ABP (*Activation by Personalization*), normalmente utilizados em redes LoRaWAN, pois a cada *upstream* enviado ao *gateway* deve ser utilizada uma frequência diferente, aumentando assim consideravelmente o tempo de transmissão e recebimento de dados, já que para Join-Request, por exemplo, os canais devem ser selecionados aleatoriamente. Nesta situação, além da demora para realização de um *join* utilizando, por exemplo, a ativação OTAA, também se abre uma janela de falhas onde o não recebimento de pacotes transmitidos do dispositivo final até o *gateway* seja muito provável, já que nem sempre o dispositivo final fará a transmissão dos dados na mesma frequência fixa definida no *gateway* Dragino.

Tendo em vista a limitação do *gateway* Dragino LG02, em relação ao uso de apenas uma frequência e as especificações de LoRa Alliance, referente a *upstream* e *downstream* conclui-se que o *gateway* Dragino LG02 não possui total suporte para funcionamento como *gateway* LoRaWAN, sendo assim não recomendado para uso na criação da rede LoRaWAN como previsto inicialmente no capítulo 7.

Devido a incompatibilidade do Dragino LG02 para uso com a rede LoRaWAN, fez-se necessário a utilização de um novo dispositivo *gateway* capaz de suportar o *upstream* e *downstream* em múltiplas frequências, de acordo com as especificações da LoRa Alliance, para isso, foi selecionado o Gateway LoRaWAN Radioenge.

## 6.5 GATEWAY LORA RADIOENGE

A Radioenge é uma empresa com tecnologia própria e 100% nacional, sendo líder no mercado de rádios em rede MESH para aplicações em *smart grid* e segurança. Foi fundada em 2007 e é focada no desenvolvimento de soluções utilizando comunicação digital RF, como é o caso do módulo de desenvolvimento RF LoRaMesh Radioenge, que utiliza modulação LoRa e é parte integrante do dispositivo Gateway LoRaWAN Radioenge (RADIOENGE, c2020).

Segundo RADIOENGE (2020), o Gateway LoRaWAN Radioenge faz uso da modulação LoRa/CSS, possibilitando a comunicação de longo alcance para projetos IoT, além disso é capaz de receber pacotes em até oito canais simultaneamente.

**Figura 25 - Gateway LoRaWAN Radioenge**



**Fonte: RADIOENGE (2020)**

De acordo com RADIOENGE (2020), o *gateway* faz uso de 3 dispositivos em conjunto para implementação e funcionamento da camada de rede LoRaWAN, sendo eles:

- **Gateway LoRa:** realiza a ponte entre a camada física do tipo LoRa e a interface SPI.
- **Raspberry Pi 3:** recebe os dados pela Interface SPI (*Media Access Control*) e realiza o envio dos mesmos até o *Network Server* através do protocolo de comunicação TCP/IP.
- **Shield Radioenge RPi3-GWHat:** realiza a conexão entre o *gateway* LoRa e o Raspberry Pi.

Para realizar o envio dos pacotes RF recebidos pelo concentrador através de um link TCP-IP e transmitir pacotes de RF enviados pelo servidor, o Gateway LoRaWAN Radioenge utiliza o programa *open-source* LoRa *packet forward* desenvolvido inicialmente pela empresa Semptech-Cycleo em 2013 e disponibilizado na plataforma GitHub ([https://github.com/Lora-net/packet\\_forwarder](https://github.com/Lora-net/packet_forwarder)).

Para realizar a comunicação do “*packet forward*” com o servidor são utilizadas mensagens JSON (Notação de Objetos JavaScript) contendo alguns campos, como frequência de transmissão/receptação do pacote, tamanho do *payload* (dados da transmissão), parâmetros LoRa entre outros dados relevantes para a comunicação sem fio.

O *gateway* vem acompanhado de uma antena que opera na faixa de 902 a 928Mhz e com ganho de 3dbi, respeitando as restrições impostas pelo Ato n° 1448 de 04 de dezembro de

2017 da ANATEL o qual define que no Brasil o ganho máximo para antenas de radiofrequência não pode ultrapassar o valor de 6dbi (RADIOENGE, 2020).

### 6.5.1 Especificações Técnicas

O Gateway LoRaWAN Radioenge é capaz de trabalhar com frequências que vão de 902 a 928 MHz em modo de operação *Half-Duplex* (TDD). Neste modo é realizada uma comunicação *full-duplex* sobre um canal *half-duplex*.

**Tabela 3 - Especificações Transmissor e Receptor Gateway Radioenge**

Transmissor/Receptor	
Frequência	902.5-907 e 915-928MHz
Taxa de Dados RF	21.9kbps (efetivo máximo)
Largura de Banda	125 kHz / 250kHz / 500kHz
Potência de Saída	Standard: 0,5W / +27dBm
Tolerância de Frequência	Standard: ±5.0ppm
Modulação/Espalhamento	CSS/LoRa (125/250/500KHz)
Sensibilidade (BER 0,1%)	137dBm / -92dBm
Nível Máximo de Entrada	-20 dBm operação normal / 0 dBm máximo
Conector	SMA-M

Fonte: Adaptado de RADIOENGE (2020)

**Tabela 4 - Especificações Alimentação Gateway Radioenge**

Alimentação	
Tensão de Entrada	+5.0 VDC
Consumo	RX: 300mA / TX: 700 mA

Fonte: Adaptado de RADIOENGE (2020)

### 6.5.2 Configuração do Gateway Radioenge

Por padrão o *gateway* Radioenge já vem pré-configurado para funcionamento. Desta maneira, se fez necessária apenas a ligação do dispositivo na rede através da conexão Ethernet

e posteriormente a configuração das informações do servidor e plano de frequências a serem utilizados, semelhante ao que foi posteriormente configurado do *gateway* Dragino.

Para configuração destas informações, seguindo o manual do fabricante Radioenge, foi utilizado o programa “putty”, o mesmo permite acesso ao terminal SSH (Secure Shell) do *gateway* Radioenge através do endereço IP ao qual ele foi vinculado. Diferente do *gateway* Dragino, o Radioenge não possui uma interface *web* para configuração, sendo toda ela realizada através de linha de comando.

Conforme manual da Radioenge, foi realizada a configuração do ID do *gateway*, inicialmente acessando o diretório do programa “packet forward” utilizando o comando Linux “cd /opt/LoRa/packet\_forwarder/lora\_pkt\_fwd/” e posteriormente atualizando a informação do ID no arquivo local\_conf.json através do comando “sudo ./update\_gwid.sh local\_conf.json”. Este comando gera o ID do *gateway* através do executável “update\_gwid.sh” e o salva no arquivo “local\_conf.json”, conforme Figura 26.

Figura 26 - Geração ID Gateway Radioenge

```

pi@LoRaWAN_GW_105: /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd
Filesystem      Size  Used Avail Use% Mounted on
/dev/root        1.3G  1.3G   0 100% /
devtmpfs        460M   0  460M   0% /dev
tmpfs            464M   0  464M   0% /dev/shm
tmpfs            464M  12M  452M   3% /run
tmpfs            5.0M  4.0K  5.0M   1% /run/lock
tmpfs            464M   0  464M   0% /sys/fs/cgroup
/dev/mmcblk0p1  44M   23M  22M   51% /boot
tmpfs            93M   0   93M   0% /run/user/1000
pi@LoRaWAN_GW_105: /var/log $ cd /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd/
pi@LoRaWAN_GW_105: /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd $ sudo ./update_gwid.sh local_conf.json
Gateway ID set to b827ebFFFE2808b7 in file local_conf.json
pi@LoRaWAN_GW_105: /opt/LoRa/packet_forwarder/lora_pkt_fwd $

```

Fonte: O autor (2020)

O ID gerado neste processo foi utilizado para realizar o cadastro do *gateway* no servidor TTN, assim como no registro do *gateway* Dragino no subcapítulo 8.2 deste trabalho.

Após a atualização do ID e registro do *gateway* no servidor TTN, seguindo o manual Radioenge deve ser realizada a configuração do arquivo “global\_conf.json”. Este arquivo está na mesma pasta do “local\_config.json” e contém as configurações do servidor e portas que serão utilizadas e que foram definidas conforme Figura 27 abaixo.

Figura 27 - Geração ID Gateway Radioenge

```

"server_address": "thethings.meshed.com.au",
"serv_port_up": 1700,
"serv_port_down": 1700,

```

Fonte: O autor (2020)

Além das informações de servidor e portas, o arquivo contém informações do plano de frequências que será utilizado pelo *gateway* para transmissão e recepção de dados. Por padrão o *gateway* está configurado com o plano de frequências US902-928MHz, desta maneira foi necessário substituir o arquivo pelo mais adequado, de acordo com o plano de frequências que deve ser utilizado no Brasil (AU915-928Mhz). Este e outros arquivos de plano de frequências estão disponíveis na plataforma GitHub (<https://github.com/TheThingsNetwork/gateway-conf.git>) disponibilizada pela **The Things Network**.

Após realizadas as configurações necessárias no *gateway* Radioenge e registro do mesmo no servidor TTN, segundo informações do manual Radioenge é necessário reiniciar o serviço do “packet forward”, para isso, foi executado o comando “sudo service packet-forwarder restart”, este é o mesmo procedimento utilizado caso o concentrador do *gateway* não seja inicializado.

Da mesma maneira que com o *gateway* Dragino, após reiniciar o serviço do “packet forward”, foi possível observar a comunicação bem-sucedida entre *gateway* Radioenge e servidor TTN, possibilitando a partir deste momento a realização dos testes de comunicação da nova rede LoRa criada.

**Figura 28 - Status Gateway LoRaWAN Radioenge no servidor TTN**



**Fonte: O autor (2020)**

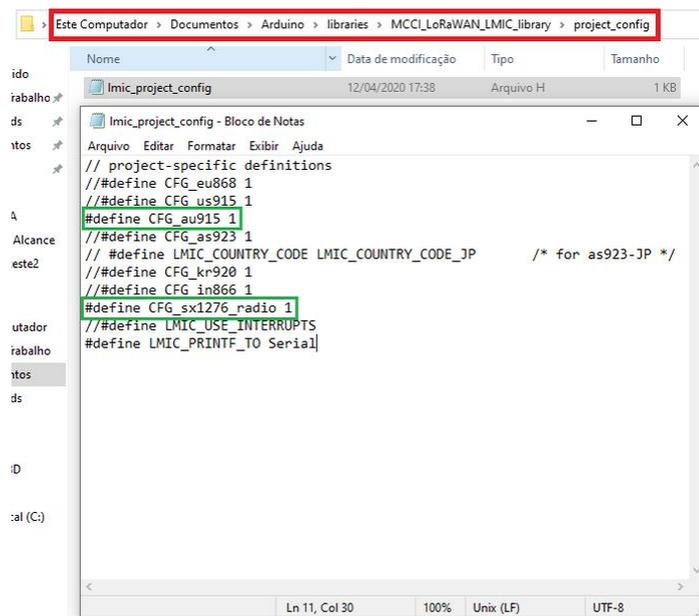
Para realizar a configuração do dispositivo ESP32, tendo em vista as especificações mencionadas no subcapítulo 8.4.1, foi utilizada a biblioteca “MCCI Arduino LoRaWAN” disponibilizada pela Corporação MCCI na plataforma GitHub (<https://github.com/mcci-catena/arduino-lmic>). Esta biblioteca é uma das citadas nos fóruns da **The Things Network** e é constantemente atualizada pelos usuários da comunidade. Dentre os principais motivos para

escolha desta biblioteca, além de ser atualizada, é a presença das configurações necessárias para funcionamento com o plano de frequências AU915.

A fim de certificar o correto funcionamento da rede LoRa criada, com relação ao uso do protocolo LoRaWAN, foram realizados novos testes de comunicação utilizando os métodos de ativação OTAA e ABP. Em ambos os testes foram utilizados os códigos de exemplo fornecidos pela própria biblioteca “MCCI Arduino LoRaWAN”. Nos códigos utilizados foram alteradas apenas as chaves de ativação, substituindo-as pelas chaves disponibilizadas no console do servidor TTN.

Além do código, também foi realizada a configuração do plano de frequências que deve ser utilizado para comunicação do ESP32 com o *gateway*. Esta configuração foi realizada no arquivo “*lmic\_project\_config.h*”, assim como a definição do transceptor utilizada no dispositivo Heltec ESP32 v2. O arquivo em questão está localizado dentro da pasta da própria biblioteca, conforme pode ser observado na Figura 29 abaixo.

**Figura 29 - Arquivo da configuração LMIC**



```
// Este Computador > Documentos > Arduino > libraries > MCCI_LoRaWAN_LMIC_library > project_config
Nome                               Data de modificação             Tipo                             Tamanho
lmic_project_config                 12/04/2020 17:38               Arquivo H                        1 KB

lmic_project_config - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
// project-specific definitions
// #define CFG_eu868 1
// #define CFG_us915 1
#define CFG_au915 1
// #define CFG_as923 1
// #define LMIC_COUNTRY_CODE LMIC_COUNTRY_CODE_JP /* for as923-JP */
// #define CFG_kr920 1
// #define CFG_in866 1
#define CFG_sx1276_radio 1
// #define LMIC_USE_INTERRUPTS
#define LMIC_PRINTF_TO Serial
```

**Fonte: O autor (2020)**

## 7 TESTES DE COMUNICAÇÃO E ALCANCE

Após todas as configurações necessárias finalizadas, tanto no *gateway* Radioenge quanto no dispositivo final, foi dado início aos testes de ativação ABP e OTAA. Primeiramente foi testado o modo ABP no qual foi possível observar os dados transmitidos serem recebidos no servidor TTN, conforme mostram as Figuras 30 e 31 a seguir.

**Figura 30 - Log do gateway no servidor TTN com ativação ABP**

GATEWAY TRAFFIC <small>beta</small>										
uplink			downlink			join			0 bytes	X
time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt				
▼ 21:39:30	926.3	lora	4/5	SF 12 BW 500	329.7	4	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 22 bytes		
▲ 21:39:29	916.2	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	4	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 26 bytes		
▼ 21:39:16	927.5	lora	4/5	SF 12 BW 500	329.7	3	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 22 bytes		
▲ 21:39:15	916.6	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	3	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 26 bytes		
▼ 21:39:02	926.9	lora	4/5	SF 12 BW 500	329.7	2	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 22 bytes		
▲ 21:39:02	916.4	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	2	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 26 bytes		
▲ 21:38:48	915.8	lora	4/5	SF 12 BW 125	1646.6	1	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 26 bytes		
▲ 21:38:34	915.4	lora	4/5	SF 12 BW 125	1155.1	0	dev addr: 26 03 1B 02	payload size: 13 bytes		

Fonte: O autor (2020)

No teste foi possível visualizar os dados serem recebidos tanto no *gateway* quanto no dispositivo que foram criados no servidor TTN.

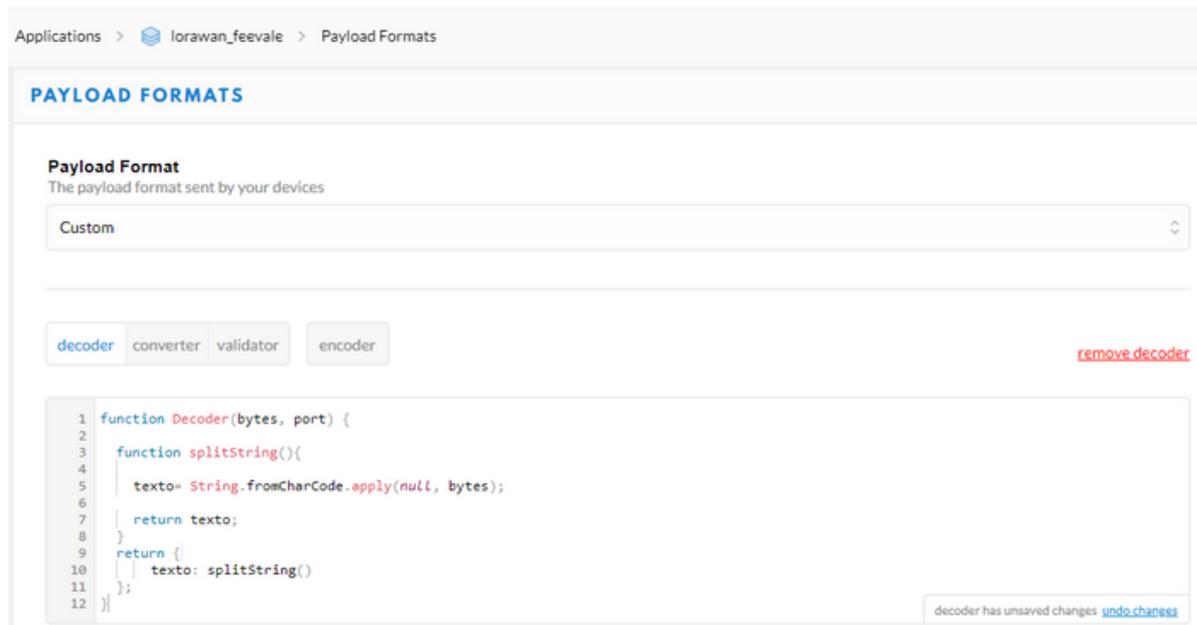
**Figura 31 - Log do dispositivo no servidor TTN com ativação ABP**

Applications > lorawan_feevale > Devices > esp32_node_abp > Data											
APPLICATION DATA											
Filters											
uplink			downlink			activation		ack		error	
time	counter	port									
▼ 21:40:27		0									
▲ 21:39:29	4	1	payload: 48 65 6C 6C 6F 2C 20 77 6F 72 6C 64 21		texto: "Hello, world!"						
▼ 21:40:14		0									
▲ 21:39:15	3	1	payload: 48 65 6C 6C 6F 2C 20 77 6F 72 6C 64 21		texto: "Hello, world!"						
▼ 21:40:00		0									
▲ 21:39:02	2	1	payload: 48 65 6C 6C 6F 2C 20 77 6F 72 6C 64 21		texto: "Hello, world!"						

Fonte: O autor (2020)

Foi possível observar também o *payload* recebido no dispositivo em formato hexadecimal e ao seu lado o texto decodificado. Para realizar a decodificação dos bytes foi necessário criar um código javascript nas opções da aplicação, mais especificamente através do menu “*Payload Formats*” no campo “*decoder*”, conforme pode ser visualizado na Figura a seguir.

**Figura 32 - Código Decoder da Aplicação**



**Fonte: O autor (2020)**

Além do modo “*Custom*” para decodificar os *bytes*, o servidor TTN também possui a opção “*Cayenne LPP*”, que como o próprio nome diz, faz a inclusão e instância da classe *CayenneLPP* para que dispositivos Arduino possam codificar os dados utilizando o *Cayenne Low Power Payload (LPP)* (The Things Network). *Cayenne Low Power Payload* disponibiliza uma maneira fácil para realizar o envio de dados utilizando o protocolo LoRaWAN, trabalha com a redução de carga útil de dados, podendo reduzir o tamanho dos dados para 11 *bytes*, permitindo assim que o dispositivo transmita múltiplos dados de sensores diferentes de uma só vez (MyDevices, c2020).

Após a confirmação do funcionamento no método ABP, foi então realizado o teste da ativação OTAA. Neste método, assim que conectado na fonte de energia pode se verificar o *Join Request* do dispositivo chegando no servidor TTN, e após o servidor retornando o novo ID do dispositivo para que ele possa começar a transmitir os dados.

**Figura 33 - Log do gateway no servidor TTN com ativação OTAA**

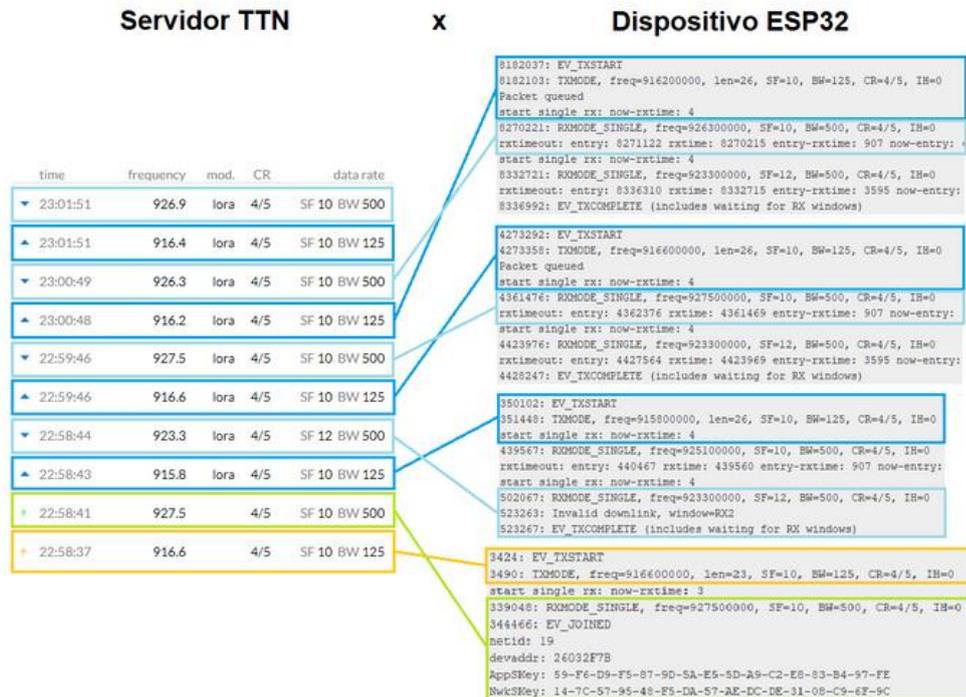
The screenshot shows the TTN Gateway Traffic log for gateway eui-b827ebfffe2808b6. The log displays a series of uplink and downlink packets. The columns include time, frequency, modulation (lora), coding rate (CR), data rate, airtime (ms), and count (cnt). Each packet also includes device address (dev addr) and payload size. The log shows alternating uplink and downlink packets with varying frequencies and data rates, indicating successful OTAA activation.

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt	dev addr	payload size
23:01:51	926.9	lora	4/5	SF 10 BW 500	92.7	3	26 03 2F 7B	22 bytes
23:01:51	916.4	lora	4/5	SF 10 BW 125	411.6	3	26 03 2F 7B	26 bytes
23:00:49	926.3	lora	4/5	SF 10 BW 500	92.7	2	26 03 2F 7B	22 bytes
23:00:48	916.2	lora	4/5	SF 10 BW 125	411.6	2	26 03 2F 7B	26 bytes
22:59:46	927.5	lora	4/5	SF 10 BW 500	92.7	1	26 03 2F 7B	22 bytes
22:59:46	916.6	lora	4/5	SF 10 BW 125	411.6	1	26 03 2F 7B	26 bytes
22:58:44	923.3	lora	4/5	SF 12 BW 500	329.7	0	26 03 2F 7B	22 bytes
22:58:43	915.8	lora	4/5	SF 10 BW 125	411.6	0	26 03 2F 7B	26 bytes
22:58:41	927.5		4/5	SF 10 BW 500	82.4			
22:58:37	916.6		4/5	SF 10 BW 125	370.7		70 B3D57ED002D0A4	00CA4163C3FD752A

**Fonte: O autor (2020)**

Como pode ser observado na Figura acima, a cada novo *uplink* de dados realizado pelo dispositivo, a frequência também é alterada, assim como a frequência de *downlink*, confirmando assim o funcionamento correto de acordo com as especificações da LoRa Alliance. Esta mesma alteração de frequências pode ser verificada diretamente nos logs do dispositivo ESP32, confirmando também que as frequências e demais parâmetros apresentados no servidor TTN foram os mesmos utilizadas no dispositivo final, conforme comparação na Figura 34 abaixo.

Figura 34 - Log servidor TTN e dispositivo ESP32 (OTAA)



Fonte: O autor (2020)

Observando o correto funcionamento da comunicação LoRa tanto na ativação ABP quanto na ativação OTAA e agora de acordo com as especificações LoRaWAN apresentadas pela LoRa Alliance, conclui-se que a rede com o *gateway* Radioenge está finalizada e pronta para utilização em projetos de pesquisa e desenvolvimento, necessitando apenas realizar a instalação do *gateway* em um local com ponto de rede, a fim de fornecer a conexão necessária para comunicação com o servidor TTN.

## 7.1 TESTE DE ALCANCE DA REDE

Conforme previsto inicialmente, para garantir que a rede LoRa criada seja suficientemente abrangente com a utilização de apenas um *gateway*, foram realizados então os testes para determinar o alcance da rede. Devido à pandemia do COVID-19, não foi possível realizar os testes no local definido inicialmente no capítulo 6, neste caso, o já citado prédio 11 da Universidade Feevale. Considerando esta pandemia e suas restrições com relação ao acesso de locais públicos e também privados com grande circulação de pessoas, foi necessário escolher um novo local para realização dos testes. Neste caso, foi escolhida a residência do autor, onde

então foi realizada a conexão do *gateway* a uma rede de internet, possibilitando sua conexão com os serviços externos necessários e consequentemente a realização dos testes de alcance.

### 7.1.1 Procedimento de Teste e Resultados

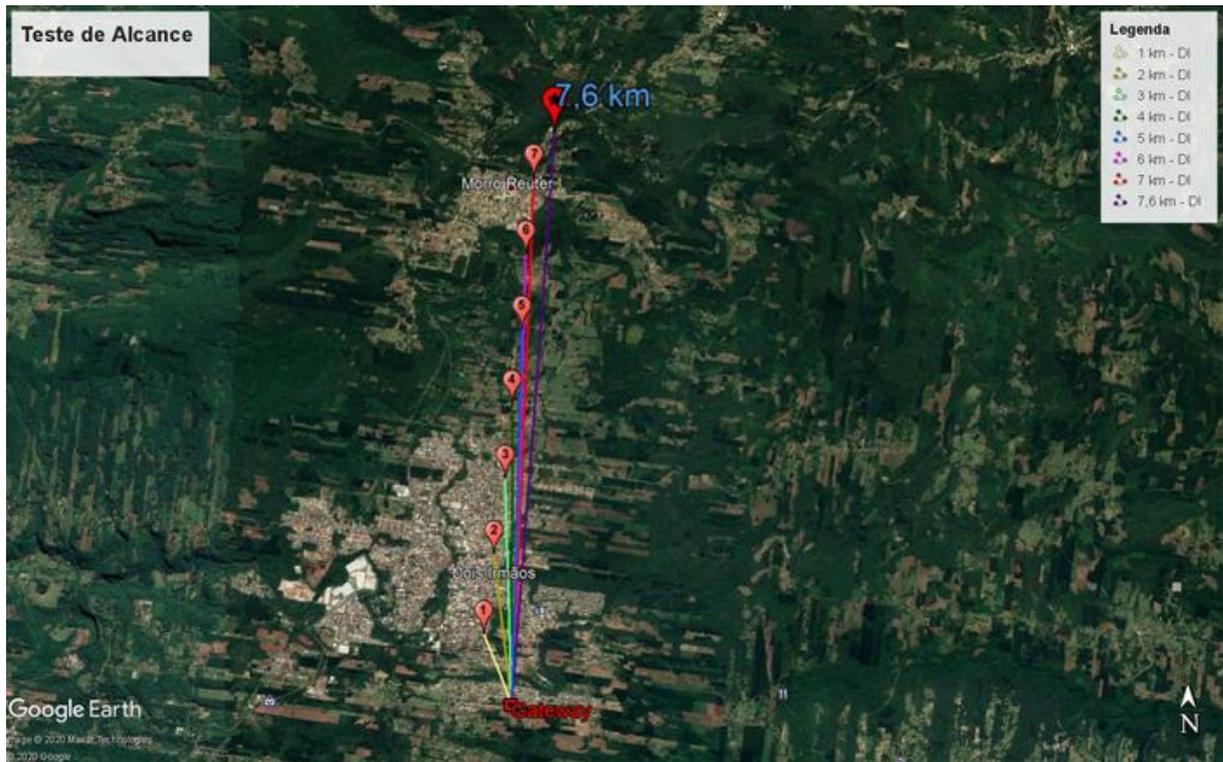
Para realização dos testes foram utilizados o *gateway* Radioenge e o dispositivo ESP32 com o código de ativação ABP. Como o *gateway* é responsável pelo recebimento dos pacotes e necessita uma conexão de internet cabeada, o mesmo foi posicionado em um mesmo local internamente na residência do autor, que está localizada a uma altura de 175 metros acima do nível do mar. Enquanto o dispositivo ESP32 responsável pelo envio de pacotes, foi ligado a uma fonte de energia externa móvel e deslocado até os diferentes locais de teste.

Os testes foram realizados alternando a distância em uma mesma direção, iniciando com 1 km de distância e alternando de um em um km para cada novo local testado. Para cada local foram realizados um total de 10 testes, os quais foram realizados em dias diferentes a fim de garantir que não houvesse uma interferência momentânea e que pudesse ser responsável por distorcer o sinal de alguma maneira.

Cada teste realizado consistiu no envio de um total de 60 pacotes. Cada pacote foi enviado com um intervalo de 20 segundos. Para identificar se existe grande variação na perda de pacotes de acordo com o tamanho dos dados enviados, foram realizados testes enviando pacotes de tamanho 4 *bytes* e 8 *bytes*. Foram realizados 5 testes para 4 *bytes* e 5 para 8 *bytes* em cada local, totalizando assim os dez testes mencionados anteriormente. Para cada tamanho de dados foi utilizado um dispositivo ESP32 diferente, os quais foram também configurados no servidor TTN.

Ao todo, os testes foram realizados em 8 cenários diferentes. Os pontos exatos podem ser visualizados na Figura 35 obtida através do programa Google Earth.

Figura 35 - Mapa dos Testes de Alcance



Fonte: O autor (2020)

Com este teste foi possível alcançar uma distância máxima aproximada de 7,6 km entre o *gateway* e dispositivo ESP32. Após os 7,6 km de distância não foi possível obter comunicação com o *gateway*. Esta limitação se deve a existência de um morro após esta distância, tornando assim inviável a comunicação, semelhante ao teste realizado em Klauck (2019), onde a existência de um morro entre os dois dispositivos WiFi ESP32 testados, limitou o alcance da rede em 2,7 km, valor inferior ao informado nas especificações do dispositivo.

O Quadro 4 abaixo apresenta os valores dos testes coletados para o envio dos pacotes de 8 *bytes*, enquanto o Quadro 5 apresenta os valores dos testes para os pacotes de 4 *bytes*.

**Quadro 4 - Teste de alcance (8 bytes)**

Testes	Pacotes Perdidos (Limitado a 60 pacotes)					Média da potência de Sinal (dBm)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1 km	0	0	0	0	1	-111	-111	-111	-109	-109
2 km	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal
3 km	39	34	32	52	55	-112	-112	-112	-111	-112
4 km	0	0	0	0	0	-111	-111	-111	-111	-111
5 km	0	7	9	31	20	-111	-112	-111	-112	-112
6 km	48	43	24	28	22	-113	-112	-113	-113	-111
7 km	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal
7,6 km	0	0	0	0	0	-111	-111	-111	-111	-111

Fonte: O autor (2020)

**Quadro 5 - Teste de alcance (4 bytes)**

Testes	Pacotes Perdidos (Limitado a 60 pacotes)					Média da potência de Sinal (dBm)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1 km	0	0	0	0	1	-110	-111	-111	-109	-108
2 km	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal
3 km	39	38	20	42	46	-111	-112	-112	-111	-111
4 km	0	3	0	1	4	-111	-111	-111	-111	-111
5 km	3	1	29	25	36	-111	-111	-111	-112	-112
6 km	54	24	32	33	10	-112	-113	-113	-113	-111
7 km	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem conexão	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal	Sem sinal
7,6 km	1	1	4	0	3	-111	-111	-111	-111	-111

Fonte: O autor (2020)

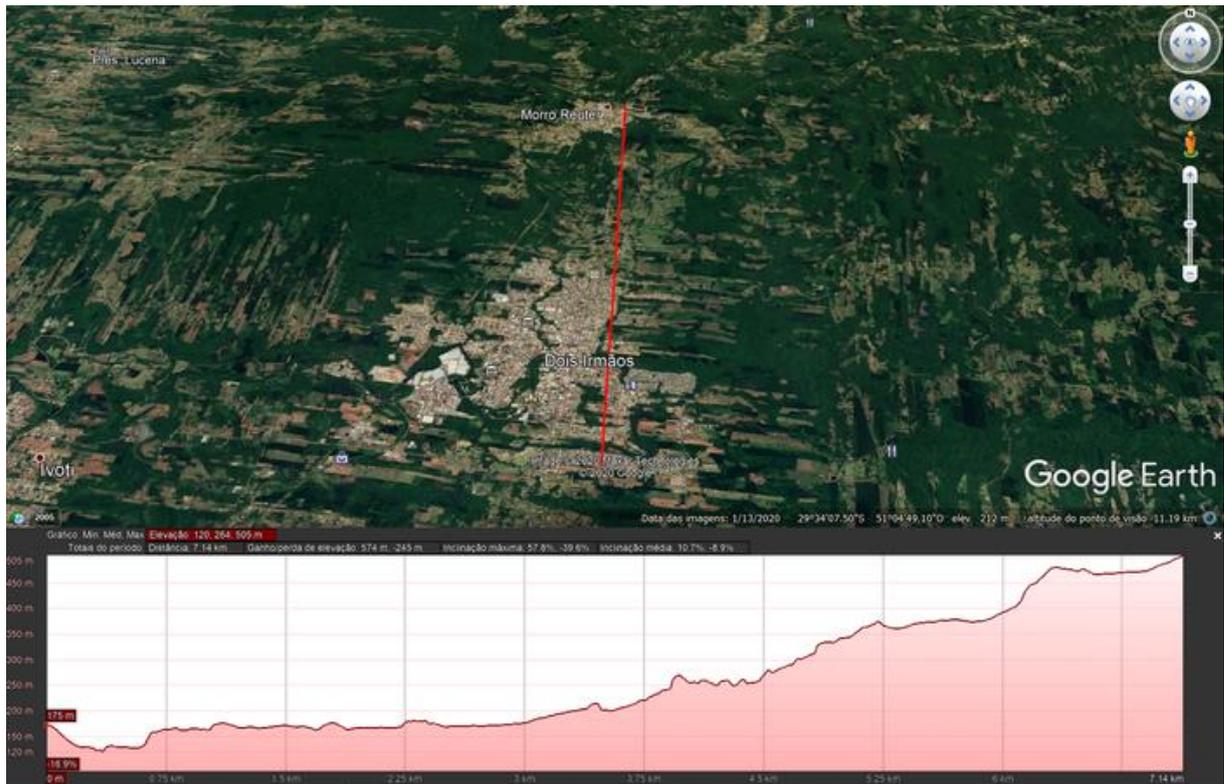
Observando os dados coletados, foi identificado que no local estabelecido de 2 km não foi possível obter sinal em nenhum dos testes realizados, assim como no cenário de 7 km. Com informações do *software* Google Earth foi levado em consideração que além da grande densidade de edificações entre o local testado e o *gateway*, o motivo da perda de sinal também é decorrida de uma pequena elevação de terreno entre os dispositivos, como pode ser visualizado no teste de 2 km da Figura 36 e de 7 km na Figura 37.

**Figura 36 - Teste de 2km de distância**



**Fonte: O autor (2020)**

**Figura 37 - Teste de 7km de distância**



**Fonte: O autor (2020)**

Com todos os dados coletados e analisados, foi possível identificar que a comunicação conseguiu em sua maioria atingir os resultados esperados com relação à distância, superando o alcance máximo de 3 km previsto nas especificações do dispositivo Heltec ESP32 v2. No alcance máximo obtido, de 7,6 km, a comunicação funcionou sem problemas, entregando praticamente cem por cento dos dados enviados, entretanto, em locais mais próximos do *gateway* onde foram detectadas elevações, houve uma perda considerável ou total de sinal, como é o caso da distância de 2 km e 7 km.

Em todos os testes realizados, verificou-se também que apesar da diferença de distância, nos locais onde a comunicação funcionou, não foi possível observar grande variação na potência do sinal de transmissão, ficando sempre na faixa de -113 a -108, conforme ilustram os gráficos das Figuras 37 e 38.

Figura 38 - Gráfico de potência nos testes de 4 bytes



Fonte: O autor (2020)

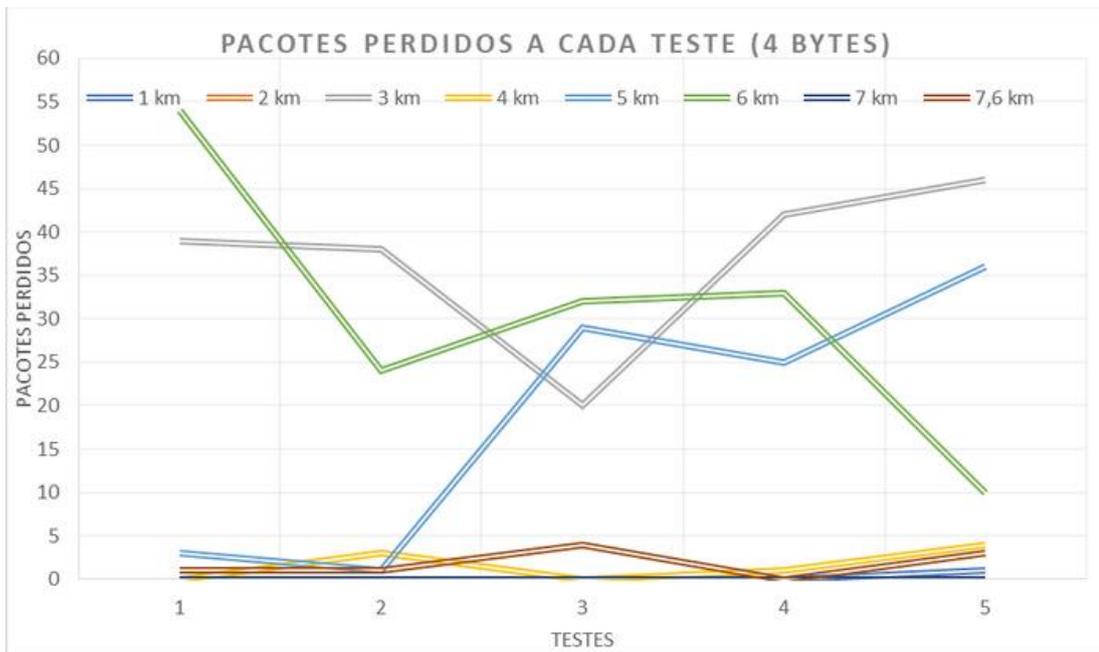
Figura 39 - Gráfico de potência nos testes de 8 bytes



Fonte: O autor (2020)

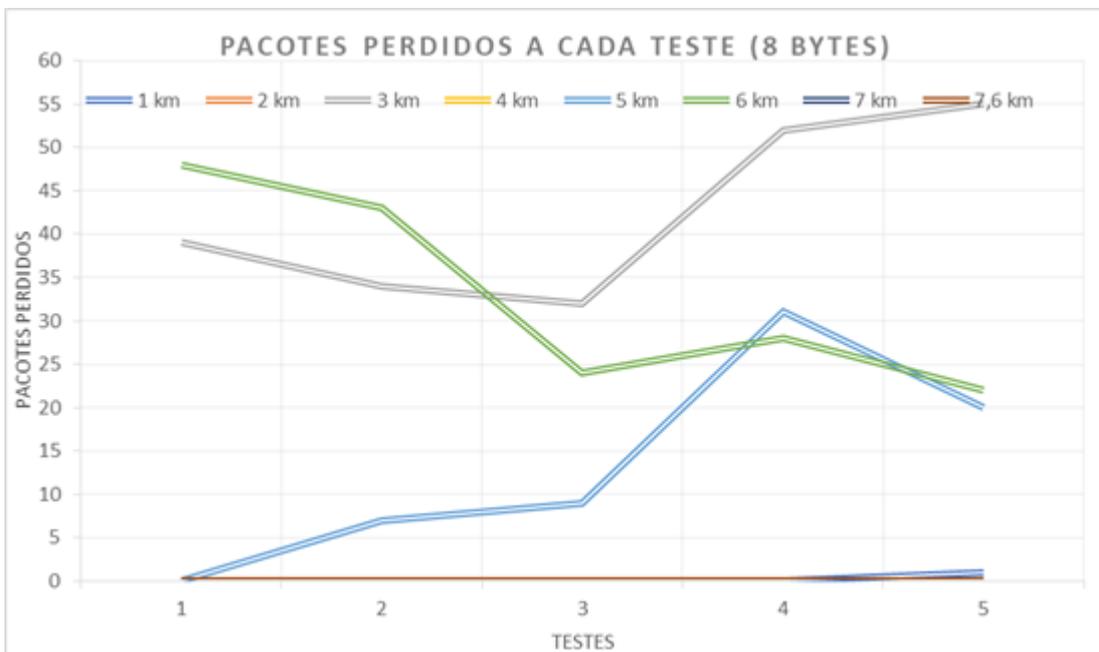
Em relação a diferença no tamanho dos dados enviados com a perda de pacotes, não foi possível observar grande relação, pois como os gráficos das Figuras 40 e 41 ilustram melhor, em alguns pontos o teste com 4 bytes obteve mais perda de dados e em outros testes obteve-se mais perda de dados com os pacotes de 8 bytes.

**Figura 40 - Pacotes perdidos nos testes de 4 bytes**



Fonte: O autor (2020)

**Figura 41 – Pacotes perdidos nos testes de 8 bytes**



Fonte: O autor (2020)

## 8 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho se observa que a Internet das Coisas é um tema que está em constante crescimento nos dias atuais, possibilitando que tudo e todos se conectem a uma rede tornando assim acessível uma infinidade de aplicações para diferentes tipos de cenários, dentre os quais podem ser citados agricultura, saúde, trânsito, tempo entre inúmeras outras possibilidades.

Para tornar esse tipo de aplicação funcional e prática são utilizadas, atualmente, várias tecnologias diferentes, principalmente quando se trata da comunicação, por ser um dos pontos fundamentais e mais importantes quando se fala em IoT. Neste caso, algumas destas tecnologias de comunicação mais utilizadas são; Zigbee, 3G/4G/5G e LPWAN.

De acordo com o estudo realizado conclui-se que a tecnologia LoRa e seu protocolo de comunicação LoRaWAN, ambas fazendo parte do tipo de rede LPWAN, são excelentes tecnologias para serem utilizadas quando se trata do cenário de IoT. LoRa e LoRaWAN são tecnologias que se complementam para atingir o máximo de proveito, principalmente quando utilizadas em aplicações onde se faz necessário o uso de redes de longo alcance e baixo consumo de energia.

Tendo em vista que dispositivos LoRa, em conjunto com o protocolo de comunicação LoRaWAN são excelentes tecnologias para serem utilizadas quando se trata de IoT e como objetivo previsto inicialmente, foi realizada a criação da rede LoRa utilizando o protocolo de comunicação LoRaWAN. Durante o processo de desenvolvimento e de acordo com os testes realizados, se identificou que o dispositivo *gateway* Dragino LG02, escolhido inicialmente, não possui suporte para implementação completa do protocolo LoRaWAN. Desta maneira, assim como em Klauck (2019), não foi possível realizar a criação da rede LoRa utilizando o *gateway* da empresa Dragino. Por este motivo, foi necessária a substituição do *gateway* proposto por um modelo capaz de suprir as necessidades com relação ao protocolo LoRaWAN e todas as especificações da LoRa Alliance para este tipo de comunicação.

Levando estes fatores em consideração, foi então utilizado o *gateway* da empresa Radioenge, o qual possibilitou o funcionamento adequado da rede com relação ao plano de frequências do Brasil (AU915-928), além do funcionamento correto com os métodos de ativação ABP e OTAA testados inicialmente no *gateway* Dragino. Para que esse procedimento de comunicação funcionasse corretamente, além da substituição do *gateway*, foi também substituída a biblioteca “lmic” utilizada no dispositivo ESP32.

Após ambos ajustes no *gateway* e dispositivo final, foi possível realizar os testes de alcance da rede LoRa. Nos testes em questão foi possível alcançar uma distância máxima de 7,6 km, no qual houve uma comunicação de boa qualidade e sem grande perda de dados. Em vias, também foi identificado que elevações de terreno entre o dispositivo ESP32 e *gateway* foram responsáveis pela perda de sinal em pontos mais próximos ao *gateway*. Desta maneira, conclui-se, que para que uma comunicação de rede seja possível em longas distâncias e sem grandes perdas de dados, é necessário que do ponto de vista do dispositivo até o *gateway* exista um campo de visão aberto.

Tendo em vista todos os procedimentos de configuração da rede com relação ao plano de frequências e métodos de ativação utilizados, tanto no *gateway* Radioenge quanto no dispositivo ESP32, além dos testes de alcance da rede, é possível concluir que a rede LoRa criada com o protocolo LoRaWAN, está pronta para utilização em novos projetos de pesquisa e desenvolvimento, sendo necessário e tendo como objetivo para um próximo estudo, a criação de uma aplicação utilizando as ferramentas de integração do servidor TTN, ou ainda, a criação de um servidor utilizando outro serviço semelhante. Um exemplo, é o ChirpStack *open-source* LoRaWAN *Network Server*, programa de código aberto que permite a criação de um servidor totalmente privado, e assim como o servidor TTN, também possui ferramentas para integração com aplicações exteriores através de uma API REST.

## REFERÊNCIAS

ARDUINO. **About Us**. c2020. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>. Acesso em: 25 Mar. 2020.

AUGUSTIN, Aloÿs 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, Jean-Paul et al. **IoT: The Era of LPWAN is starting now**. ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, 2016, p. 25-30.

BOR, Martin et al. In: PROCEEDINGS OF THE 19TH ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, ANALYSIS AND SIMULATION OF WIRELESS AND MOBILE SYSTEMS, ACM, 2016. 59-67 p.

BRASIL. Conselho Diretor da Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução n. 680, de 27 de junho de 2017. **Diário Oficial da União**, 29 de junho de 2017. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: 18 Abr. 2020.

CISCO IBSG. **A Internet das Coisas Como a próxima evolução da Internet está mudando tudo**. 2011. Disponível em: [https://www.cisco.com/c/dam/global/pt\\_br/assets/executives/pdf/internet\\_of\\_things\\_iiot\\_ibsg\\_0411final.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/executives/pdf/internet_of_things_iiot_ibsg_0411final.pdf). Acesso em: 1 Set. 2019.

COSSINI, Fabio. **LoRaWAN: uma rede alternativa para a Internet das Coisas**. 2016. Disponível em: [https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/tlcbrr/resource/TLCBR\\_Mini\\_Paper\\_Ano\\_12\\_N\\_274\\_IoT.pdf?lang=en\\_us](https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/tlcbrr/resource/TLCBR_Mini_Paper_Ano_12_N_274_IoT.pdf?lang=en_us). Acesso em: 1 Dez. 2019.

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

DRAGINO TECHNOLOGY CO., LIMITED. **Dual Channels LoRa Gateway LG02/OLG02: Dual Channel LoRa Gateway Indoor & Outdoor version**. Room 1101, City Invest Commercial Center, 546 QingLinRoad LongCheng Street, LongGang District; Shenzhen 518116, China, [s.d.]. Disponível em: [https://www.dragino.com/downloads/downloads/datasheet/EN/Datasheet\\_LG02\\_OLG02.pdf](https://www.dragino.com/downloads/downloads/datasheet/EN/Datasheet_LG02_OLG02.pdf). Acesso em: 20 Mar. 2020.

DRAGINO. **LG02/OLG02 LoRa Gateway User Manual**. 2019. Disponível em: [https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa\\_Gateway/LG02-OLG02/LG02\\_LoRa\\_Gateway\\_User\\_Manual\\_v1.5.4.pdf](https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa_Gateway/LG02-OLG02/LG02_LoRa_Gateway_User_Manual_v1.5.4.pdf). Acesso em: 2 Nov. 2019.

EGLI, Peter R.. **LPWAN – Low Power Wide Area Network**. 2015. Disponível em: [http://indigoo.com/dox/itdp/12\\_MobileWireless/LPWAN.pdf](http://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf). Acesso em: 1 Dez. 2019.

FERNANDES, A.C.P et al. Efeito Doppler com tablet e smartphone. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São paulo, v. 38, n. 3, p. e3504, 2016. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172016000300604&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172016000300604&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em 07 novembro de 2019. Epub 07-Jun-2016. Acesso em: 7 Nov. 2019.

FILHO, Aderlei; SANTIN, René Vieira; YANG, Ronaldo. **LPWAN Low power wide area network**. 2017. Disponível em: [https://www.ime.usp.br/~diogojp/computacao-movel-2017/seminar/rene\\_santin\\_LPWAN.pdf](https://www.ime.usp.br/~diogojp/computacao-movel-2017/seminar/rene_santin_LPWAN.pdf). Acesso em: 24 Ago. 2019.

GARCIA, Paulo Sérgio Rangel; KLEINSCHMIDT, João Henrique. 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. Disponível em: <http://www.sbrt.org.br/sbrt2017/anais/1570361881.pdf>. Acesso em: 11 Out. 2019.

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

HELTEC. 2018. Disponível em: <https://heltec.org/>. Acesso em: 9 Nov. 2019.

JOHANN, G.. **Linear chirp**. 2010. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cf/Linear-chirp.svg>. Acesso em: 2 Nov. 2019.

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

LOPEZ RESEARCH LLC. **Uma introdução à Internet da Coisas (IoT)**: Parte 1. da “Série de IoT”. 2013. Disponível em: [https://www.cisco.com/c/dam/global/pt\\_br/assets/brand/iot/iot/pdfs/lopez\\_research\\_an\\_introduction\\_to\\_iiot\\_102413\\_final\\_portuguese.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/brand/iot/iot/pdfs/lopez_research_an_introduction_to_iiot_102413_final_portuguese.pdf). Acesso em: 19 Out. 2019.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN What is it?: A technical overview of LoRa and LoRaWAN**. Technical Marketing Workgroup 1.0, 2015. Disponível em: [https://www.tuv.com/media/corporate/products\\_1/electronic\\_components\\_and\\_lasers/TUeV\\_Rheinland\\_Overview\\_LoRa\\_and\\_LoRaWANtmp.pdf](https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf). Acesso em: 25 Ago. 2019.

LORA ALLIANCE. **RP002-1.0.1 LoRaWAN Regional Parameters**. Fremont, CA 94538, EUA, c2020. Disponível em: [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2020-02/rp\\_2-1.0.1.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2020-02/rp_2-1.0.1.pdf). Acesso em: 10 Mar. 2020.

MADAKAM, Somayya; RAMASWAMY, R; TRIPATHI, Siddharth. **Internet of Things (IoT): A literature review.** *Journal of Computer and Communications*, v. 3. 2015. (05). Disponível em: [http://file.scirp.org/pdf/JCC\\_2015052516013923.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JCC_2015052516013923.pdf). Acesso em: 25 Ago. 2019.

MAGRIN, Davide; CENTENARO, Marco; VANGELISTA, Lorenzo. Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario. In: 2017 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), IEEE, 2017. 1-7 p.

MANIEWICZ, Mario. **Digital Revolution: are we ready?.** 2014. Disponível em: [https://www.itu.int/en/ITU-D/Conferences/GSR/Documents/GSR2014/GSR14\\_Opening\\_Debate\\_Maniewicz.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Conferences/GSR/Documents/GSR2014/GSR14_Opening_Debate_Maniewicz.pdf). Acesso em: 5 Set. 2019.

MINERVA, Roberto; BIRU, Abyi; ROTONDI, Domenico. **Towards a definition of the Internet of Things (IoT):** Revision 1. 2015. ed. IEEE, 2015. Disponível em: [https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE\\_IoT\\_Towards\\_Definition\\_Internet\\_of\\_Things\\_Revision1\\_27MAY15.pdf](https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf). Acesso em: 19 Out. 2019.

MYDEVICES. **Cayenne Docs.** c2020. Disponível em: <https://developers.mydevices.com/cayenne/docs/lora/#lora-about-deveuis>. Acesso em: 20 Mai. 2020.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2. ed. Novo Hamburgo, RS: Feevale, 2013.

RABUSKE, Matheus H. Baumgarten. **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. Disponível em: [http://w3.ufsm.br/ecomp/images/TCC\\_Matheus\\_Rabuske.pdf](http://w3.ufsm.br/ecomp/images/TCC_Matheus_Rabuske.pdf). Acesso em: 15 Nov. 2019.

RADIOENGE. **LoRaMESH Gateway. Manual Técnico:** Rev. 4 Fev. 2020. Disponível em: [https://www.radioenge.com.br/uploads/5117d6a3612da70ca553028d2fb710ca1582919789-Manual\\_Tecnico\\_LoRaMeshGateway\\_rev4.pdf](https://www.radioenge.com.br/uploads/5117d6a3612da70ca553028d2fb710ca1582919789-Manual_Tecnico_LoRaMeshGateway_rev4.pdf). Acesso em: 20 Mai. 2020.

RADIOENGE. **Sobre.** c2020. Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/sobre.php>. Acesso em: 20 Mai. 2020.

SANTOS, Bruno P. et al. **Internet das Coisas: da Teoria à Prática.** 2016. Disponível em: <https://homepages.dcc.ufmg.br/~bruno.ps/wp-content/uploads/2016/05/minicurso-sbrc-2016.pdf>. Acesso em: 19 Ago. 2019.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overvie:** Technical Paper. 2019. Disponível em: <https://lora->

developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\_and\_LoRaWAN-A\_Tech\_Overview-Downloadable.pdf. Acesso em: 10 Mai. 2020.

SERAFIM, Edivaldo. **Uma Estrutura de Rede Baseada em Tecnologia IoT para Atendimento Médico a Pacientes Remotos.** 2014. Disponível em: [http://www.cc.faccamp.br/anaisdowcf/edicoes\\_anteriores/wcf2014/arquivos/16/paper\\_16.pdf](http://www.cc.faccamp.br/anaisdowcf/edicoes_anteriores/wcf2014/arquivos/16/paper_16.pdf). Acesso em: 24 Ago. 2019.

SILVA, Jonathan de Carvalho et al. **LoRaWAN - A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities.** 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Jonathan\\_De\\_Carvalho\\_Silva/publication/318866065\\_LoRaWAN\\_-\\_A\\_Low\\_Power\\_WAN\\_Protocol\\_for\\_Internet\\_of\\_Things\\_a\\_Review\\_and\\_Opportunities/links/59824310aca272a370f58085/LoRaWAN-A-Low-Power-WAN-Protocol-for-Internet-of-Things-a-Review-and-Opportunities.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jonathan_De_Carvalho_Silva/publication/318866065_LoRaWAN_-_A_Low_Power_WAN_Protocol_for_Internet_of_Things_a_Review_and_Opportunities/links/59824310aca272a370f58085/LoRaWAN-A-Low-Power-WAN-Protocol-for-Internet-of-Things-a-Review-and-Opportunities.pdf). Acesso em: 2 Nov. 2019.

SORNIN (SEMTECH), N. et al. LoRaWAN Specification. **LoRa Alliance, Inc**, v. 1.0.2, jul 2016. Disponível em: [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-05/lorawan1\\_0\\_2-20161012\\_1398\\_1.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-05/lorawan1_0_2-20161012_1398_1.pdf). Acesso em: 2 Nov. 2019.

THE THINGS NETWORK. **Gateway Registration.** c2020. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/registration.html>. Acesso em: 7 Mar. 2020.

VIEIRA, Luiz Filipe M. et al. Analysis of Aloha Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks. Disponível em: [https://pdfs.semanticscholar.org/0958/62fcbbbde81ba0cbb51831276e8c0e70accb.pdf?\\_ga=2.59472680.461302590.1574025770-1370991106.1574025770](https://pdfs.semanticscholar.org/0958/62fcbbbde81ba0cbb51831276e8c0e70accb.pdf?_ga=2.59472680.461302590.1574025770-1370991106.1574025770)>. Acesso em 17 de novembro de 2019.

WERNER, Thiago. **Uso da tecnologia LoRaWAN para o monitoramento de dados ambientais.** 2018. Disponível em: [https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/7/77/TCC290\\_Thiago\\_Werner.pdf](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/7/77/TCC290_Thiago_Werner.pdf). Acesso em: 1 Dez. 2019.

## APÊNDICE A – CÓDIGO DE ATIVAÇÃO OTAA DA BIBLIOTECA FORNECIDA PELA EMPRESA DRAGINO

Código completo de ativação OTAA utilizado no dispositivo ESP32 responsável por realizar a comunicação com o *gateway* Dragino LG02. Este é o código que faz uso da biblioteca “arduino-lmic-master” disponibilizada pela empresa Dragino.

```

1  #include <lmic.h>
2  #include <hal/hal.h>
3  #include <SPI.h>
4
5  static const ul_t PROGMEM APPEUI[8]={ 0xA4, 0xD0, 0x02, 0xD0, 0x7E, 0xD5, 0xB3, 0x70
6  };// Chave AppEUI em formato LSB
7  void os_getArtEui (ul_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8);}
8
9  static const ul_t PROGMEM DEVEUI[8]={ 0x2A, 0x75, 0xFD, 0xC3, 0x63, 0x41, 0xCA, 0x00
10 };// Chave DevEUI em formato LSB
11 void os_getDevEui (ul_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);}
12
13 static const ul_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0xE1, 0xB2, 0xF6, 0x30, 0x24, 0xF7, 0x38,
14 0x69, 0xB0, 0x13, 0x59, 0x40, 0xDF, 0x7B, 0xF9, 0x79 };// Chave AppKey em formato MSB
15 void os_getDevKey (ul_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16);}
16
17 static uint8_t mydata[] = "Hello, world!"; // Define o dado que será enviado
18 static osjob_t sendjob;
19
20 const unsigned TX_INTERVAL = 60;// Define o intervalo de transmissões
21
22 const lmic_pinmap lmic_pins = { // Realiza o mapeamento dos pinos LoRa - Adaptado
23 para a placa Heltec ESP32 v2
24 .nss = 18,
25 .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
26 .rst = 14,
27 .dio = {26, 35, 34},
28 };
29
30 void onEvent (ev_t ev) { // Executa as tarefas de acordo com os eventos definidos na
31 biblioteca LMIC
32 Serial.print(os_getTime());
33 Serial.print(" : ");
34 switch(ev) {
35 case EV_SCAN_TIMEOUT:
36 Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
37 break;
38 case EV_BEACON_FOUND:
39 Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
40 break;
41 case EV_BEACON_MISSED:
42 Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
43 break;
44 case EV_BEACON_TRACKED:
45 Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
46 break;
47 case EV_JOINING:
48 Serial.println(F("EV_JOINING"));
49 break;
50 case EV_JOINED:
51 Serial.println(F("EV_JOINED"));
52 break;
53 case EV_RFU1:
54 Serial.println(F("EV_RFU1"));
55 break;
56 case EV_JOIN_FAILED:
57 Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
58 break;
59 case EV_REJOIN_FAILED:
60 Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
61 break;
62 case EV_TXCOMPLETE:
63 Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)"));
64 if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
65 Serial.println(F("Received ack"));
66 if (LMIC.dataLen) {
67 Serial.println(F("Received "));
68 Serial.println(LMIC.dataLen);
69 Serial.println(F(" bytes of payload"));
70 }
71 os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime()+sec2osticks(TX_INTERVAL),
72 do_send); // Agenda o próximo envio de dados

```

```

68         break;
69     case EV_LOST_TSYNC:
70         Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
71         break;
72     case EV_RESET:
73         Serial.println(F("EV_RESET"));
74         break;
75     case EV_RXCOMPLETE:
76         // data received in ping slot
77         Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
78         break;
79     case EV_LINK_DEAD:
80         Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
81         break;
82     case EV_LINK_ALIVE:
83         Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
84         break;
85     default:
86         Serial.println(F("Unknown event"));
87         break;
88     }
89 }
90
91 void do_send(osjob_t* j){
92     if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) { // Verifica se existe algum serviço de TX/RX em
93         andamento
94         Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
95     } else {
96         LMIC_setTxData2(1, mydata, sizeof(mydata)-1, 0); // Prepara os dados para
97         serem transmitidos
98         Serial.println(F("Packet queued"));
99     }
100     // A próxima transmissão é agendada após o evento TX_COMPLETE
101 }
102
103 void setup() {
104     Serial.begin(115200);
105     Serial.println(F("Starting"));
106
107     os_init(); // Inicia o LMIC (LoraWAN-MAC-in-C)
108     LMIC_reset(); // Reseta o estado do MAC. A sessão e dados de transmissões
109     pendentes serão descartados.
110     do_send(&sendjob); // Inicia o processo
111 }
112
113 void loop() {
114     os_runloop_once();
115 }

```