

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

MAIRA WEHEBRINK

**AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA LORAWAN COMO SOLUÇÃO DE  
COMUNICAÇÃO PARA APLICAÇÕES EM INTERNET DAS COISAS  
NA CIDADE DE PATO BRANCO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

**MAIRA WEHEBRINK**

**AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA LORAWAN COMO SOLUÇÃO DE  
COMUNICAÇÃO PARA APLICAÇÕES EM INTERNET DAS COISAS  
NA CIDADE DE PATO BRANCO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Favarim

Co-orientador: Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin

**PATO BRANCO**

**2021**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC**

**AValiação DA TECNOLOGIA LORAWAN COMO SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO PARA APLICAÇÃO EM INTERNET DAS COISAS NA CIDADE DE PATO BRANCO**

Por  
Maira Wehebrink

Monografia apresentada às 13 horas 30 min. do dia 17 de agosto de 2021 como requisito parcial, para conclusão do Curso de Engenharia da Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Msc. Adriano Serckumecka	Membro
Prof. Msc. Luis Cassiano Gourlate Rista	Membro
Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin	Co-orientador
Prof. Dr. Fábio Favarim	Orientador
Profa. Dra. Viviane Dal Molin de Souza	Professor(a) responsável TCCII

Dedico este trabalho à minha mãe (e pai) e aos meus irmãos, que sonharam esse sonho comigo. Obrigada!

## AGRADECIMENTOS

Esta fase da minha vida é muito especial e não posso deixar de agradecer, primeiramente, a Deus por toda força, ânimo e coragem que me ofereceu para ter alcançado minha meta ao longo deste processo complicado e desgastante.

Agradeço à minha mãe, Idaci, mulher forte, guerreira, batalhadora que sempre contribuiu muito com a minha bagagem de conhecimentos, sendo o principal pilar da minha formação como ser humano. Responsável também, pela maior herança da minha vida: meus estudos. À você, mãe, devo meu título universitário. Mãe, posso tentar fazer tudo para retribuir o que você fez por mim, mas sei que nunca vou conseguir nem chegar perto, então, queria deixar aqui registrado todo o amor que sinto por você.

Agradeço aos meus irmãos, Marcio e Marcelo, por acreditarem no meu potencial (muitas vezes mais que eu) e investir em mim. Agradeço também pelos sobrinhos lindos que me deram de presente, que trazem tanta alegria e orgulho. E claro, agradeço aos meus sobrinhos, Kauany e Arthur, pelos carinhos e alegrias que me proporcionam.

Agradeço à você, Thiago, pessoa com quem amo partilhar a vida. Obrigada pelo carinho, paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre. Você jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Obrigada por me acompanhar em todas as longas noites de testes. Eu amo você!

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso, em especial, Adami, Elza, Ken e Luiz: foi com vocês que convivi intensamente os últimos anos, agradeço pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como profissional.

Agradeço todo o corpo docente que me instruiu durante esses anos com excelência e qualidade técnica. À banca, pelo seu apoio e tempo dedicados à mim. E, em especial, agradeço ao meu orientador Fábio Favarim e ao meu coorientador Gustavo Denardin, que além de pessoas incríveis, são profissionais que admiro e me inspiro. Como diria Isaac Newton: “Se enxerguei mais longe, foi porque estava sobre ombros de gigantes”.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Pato Branco, tanto pela estrutura de qualidade quanto pela bolsa de apoio ao Trabalho de Conclusão de Curso, que

contribuiu muito para que esse trabalho fosse desenvolvido. E também, agradeço a prefeitura de Pato Branco, que contribuiu e permitiu que eu usasse a infraestrutura e locais pertencentes a prefeitura para a instalação de equipamentos referentes a este TCC. E também, ao Tiago Santa Rosa, que, gentilmente, deixou que usasse sua cobertura para a instalação do equipamento, tornando possível a realização dos testes.

E por fim, mas não menos importante, sou grata à Justiça Federal do Paraná, que me concedeu a chance de fazer estágio supervisionado e assim conhecer um pouco mais da minha área de formação. Obrigada por confiarem nos conhecimentos que adquiri durante minha faculdade.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.” **Carl Gustav Jung**

## RESUMO

WEHEBRINK, Maira. AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA LORAWAN COMO SOLUÇÃO DE COMUNICAÇÃO PARA APLICAÇÕES EM INTERNET DAS COISAS NA CIDADE DE PATO BRANCO. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

A Internet das Coisas é um conceito e um paradigma tecnológico que é utilizado por diversas fontes para descrever a comunicação entre objetos inteligentes por meio de conexão sem fio em redes chamadas de LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Este paradigma permite que esses objetos sejam capazes, em rede, de interagir entre si e, com isso, cooperar para criar novas aplicações, resolver problemas ou atingir objetivos em comum. Alguns problemas que a IoT (*Internet of Things*) enfrenta é a distância entre os dispositivos finais e o *gateway* e também o consumo de energia. A rede LoRaWAN além de ser uma tecnologia com longo alcance e baixo consumo, também oferece redução significativa do tráfego, segurança e redução de latência. Devido à essas características, a rede LoRaWAN é mais utilizada a cada dia que passa na área de IoT. O alcance dessa rede pode atingir até 15 km de distância em áreas rurais, e 5 km em áreas urbanas. Este trabalho mostra a avaliação para implantação de uma rede LoRaWAN no município de Pato Branco, como estudo de caso, demonstrando a viabilidade da comunicação neste município. Expõe, também, a qualidade de comunicação entre os nós e o desempenho de acordo com a distância entre eles e o fator de espalhamento, e definindo como alcance e potência dependem de parâmetros da rede e do cenário em que se encontram. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da rede no município de Pato Branco, cobrindo uma área considerável, permitindo diferentes aplicações utilizando essa tecnologia.

**Palavras-chave:** LoRa, LoRaWAN, IoT, estudo de viabilidade, LPWAN.



## ABSTRACT

WEHEBRINK, Maira. EVALUATION OF LORAWAN TECHNOLOGY AS A COMMUNICATION SOLUTION FOR INTERNET OF THINGS APPLICATIONS IN THE CITY OF PATO BRANCO. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

The Internet of Things is a concept and a technological paradigm that is used by several sources to describe the communication between smart objects through a wireless connection in networks called LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). This paradigm allows these objects to be able, in a network, to interact with each other and, therefore, cooperate to create new applications, solve problems or achieve common goals. Some problems that the IoT (*Internet of Things*) faces is the distance between the end devices and the *gateway* and also the power consumption. The LoRaWAN network, in addition to being a technology with long range and low consumption, also offers significant traffic reduction, security and latency reduction. Due to these characteristics, the LoRaWAN network is more used every day that passes in the IoT area. The range of this network can reach up to 15 km away in rural areas, and 5 km in urban areas. This work shows the evaluation for the implantation of a LoRaWAN network in the city of Pato Branco, as a case study, demonstrating the viability of communication in this city. It also exposes the quality of communication between nodes and the performance according to the distance between them and the scattering factor, and defining how range and power depend on network parameters and the scenario in which they are located. The results obtained demonstrate the viability of the network in the municipality of Pato Branco, covering a considerable area, allowing different applications using this technology.

**Keywords:** LoRa, LoraWAN, IoT, viability study, LPWAN.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Elementos da IoT	12
FIGURA 2	– Topologias de rede: a) Topologia do tipo <i>Mesh</i> , b) Topologia do tipo Estrela	15
FIGURA 3	– Divisão espectral do planeta Terra	17
FIGURA 4	– Processo de demodulação	17
FIGURA 5	– Processo de modulação	18
FIGURA 6	– Variação de frequência ao longo do tempo de um sinal de amostra emitido por um transmissor LoRa	19
FIGURA 7	– Arquitetura de uma rede LoRaWAN	21
FIGURA 8	– Módulo TTGO com GPS e antena	24
FIGURA 9	– Módulo LoRaWAN Radioenge acoplado com a interface USB	25
FIGURA 10	– <i>Gateway</i> Radioenge	26
FIGURA 11	– Página Inicial TagoIO	27
FIGURA 12	– Banco de dados de pacotes recebidos pelo <i>gateway</i>	28
FIGURA 13	– Estrutura da rede LoRaWAN	28
FIGURA 14	– Fluxograma de etapas	29
FIGURA 15	– <i>Gateway</i> instalado	30
FIGURA 16	– Dispositivos finais	31
FIGURA 17	– Software de envio de comandos para o dispositivo RD49C	31
FIGURA 18	– Máquina de estados de testes	32
FIGURA 19	– Topografia de Pato Branco	32
FIGURA 20	– Topografia em torno do ponto de instalação do <i>gateway</i>	33
FIGURA 21	– Pontos de teste na cidade de Pato Branco	33
FIGURA 22	– Gráfico da taxa de perda de pacotes com o dispositivo RD49C	40
FIGURA 23	– Gráfico da taxa de perda de pacotes com o dispositivo TTGO	41
FIGURA 24	– Gráfico da vazão de pacotes com o dispositivo RD49C	41
FIGURA 25	– Gráfico da vazão de pacotes com o dispositivo TTGO	42
FIGURA 26	– Gráfico da média de RSSI com o dispositivo RD49C	42
FIGURA 27	– Gráfico da média de RSSI com o dispositivo TTGO	43
FIGURA 28	– Gráfico da média da SNR com o dispositivo RD49C	43
FIGURA 29	– Gráfico da média da SNR com o dispositivo TTGO	44
FIGURA 30	– Gráfico de comparação da vazão teórica com a vazão prática	44
FIGURA 31	– Gráfico de medidas de melhor e pior SNR com o dispositivo RD49C	45
FIGURA 32	– Gráfico de medidas de melhor e pior SNR com o dispositivo TTGO	45
FIGURA 33	– Gráfico de medidas de melhor e pior RSSI com o dispositivo RD49C	46
FIGURA 34	– Gráfico de medidas de melhor e pior RSSI com o dispositivo TTGO	46
FIGURA 35	– Gráfico de comparação de melhor e pior RSSI com o dispositivo RD49C	47
FIGURA 36	– Gráfico de comparação de melhor e pior RSSI com o dispositivo TTGO	47
FIGURA 37	– Gráfico de correlação entre RSSI e SNR para o dispositivo RD49C	49
FIGURA 38	– Gráfico de correlação entre RSSI e SNR para o dispositivo TTGO	49
FIGURA 39	– Gráfico de dependência entre RSSI e SNR pelo SF para o dispositivo RD49C	50
FIGURA 40	– Gráfico de dependência entre RSSI e SNR pelo SF para o dispositivo TTGO	50

## LISTA DE SIGLAS

IoT	<i>Internet of Things</i>
ABINC	Associação Brasileira de Internet das Coisas
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LPWANs	<i>Low Power Wide Area Networks</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
EUA	Estados Unidos da América
IA	Inteligência Artificial
BD	Banco de Dados
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LR-WPAN	<i>Low Rate - Wireless Personal Area Network</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum Modulation</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
CR	<i>Coding Rate</i>
TP	<i>Transmission Power</i>
CF	<i>Carrier Frequency</i>
QoS	Qualidade de Serviço
MAC	<i>Medium Access Control</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
ToA	<i>Time on Air</i>
TTN	<i>The Things Network</i>
DR	<i>Data Rate</i>
ToA	<i>Time on Air</i>
RSSI	<i>Received Signal Strtsength Indication</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
1.2	OBJETIVO GERAL	8
1.2.1	Objetivos Específicos	8
1.3	JUSTIFICATIVA	8
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>11</b>
2.1	INTERNET DAS COISAS	11
2.2	TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO	13
2.2.1	Wi-fi	13
2.2.2	4G/LTE	14
2.2.3	LR-WPAN	14
2.2.4	LPWAN	15
2.2.4.1	Sigfox	16
2.2.4.2	LoRa	16
2.2.4.3	LoRaWAN	20
2.3	TRABALHOS RELACIONADOS	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
3.1	MATERIAIS	24
3.1.1	Dispositivos Finais	24
3.1.2	Gateway	25
3.1.3	Servidor de Rede	26
3.1.4	Servidor de Aplicação	27
3.2	MÉTODO	28
<b>4</b>	<b>IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA LORAWAN EM PATO BRANCO</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>40</b>
5.1	TAXA DE PERDA DE PACOTES	40
5.2	VAZÃO DE PACOTES	41
5.3	RSSI	42
5.4	SNR	43
5.5	COMPARAÇÃO DA VAZÃO OBTIDA COM A VAZÃO TEÓRICA	44
5.6	ANÁLISE DE MELHOR E PIOR SNR	45
5.7	ANÁLISE DE MELHOR E PIOR RSSI	46
5.8	COMPARAÇÃO DE MEDIDAS DE MELHOR E PIOR RSSI	47
5.9	CORRELAÇÃO ENTRE O RSSI E SNR	48
5.10	DEPENDÊNCIA DO RSSI E SNR PELO SF	49
5.11	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>52</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS	54
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>
	<b>Apêndice A – CÓDIGO PHP</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a contextualização do trabalho desenvolvido. São apresentados também o problema de pesquisa, os objetivos, bem com a justificativa.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O conceito Internet das Coisas (IoT) diz respeito à uma coleção de objetos (“coisas”) compostos por eletrônica embarcada, podendo conter sensores e atuadores, que podem se conectar à Internet utilizando protocolos de rede (DUCROT et al., 2016). Ao integrar estes objetos em redes conectadas à Internet, pode-se coletar, trocar e armazenar uma grande quantidade de dados na nuvem, gerando informações e serviços em grande escala (ATZORI et al., 2010).

No Brasil não existia nenhuma entidade que fosse legítima e representativa, para fomentar a atuação e o desenvolvimento em todas as frentes do setor de IoT. Este cenário sofreu mudança significativa em 2015, quando a Associação Brasileira de Internet das Coisas (ABINC) foi fundada, estabelecendo metas por diversos objetivos relacionados ao assunto. Uma das principais é a de incentivar a troca de informações sobre IoT (ABINC, 2019). A previsão era de que existiriam cerca de 25 bilhões de equipamentos integrados à sistemas inteligentes pelo mundo até 2020 (ABINC, 2019). Isso faz com que a IoT seja considerada uma das mais promissoras plataformas de tecnologia do mundo, capaz de dar suporte à demanda por conectividade, em sua maioria sem fio.

À medida que a IoT avança, a conectividade se torna um grande desafio. Conforme cita Centenaro et al. (2016), existem duas abordagens empregadas para a questão de conectividade: a primeira diz respeito às tecnologias que usam comunicações de curto alcance, organizadas em topologia de rede *mesh*, e a segunda que é baseada em redes de telefonia celular. Porém, novas tecnologias estão ganhando cada vez mais espaço perante os modelos tradicionais. Essas tecnologias possuem maior alcance, menor consumo de energia, e alta imunidade às interferências eletromagnéticas devido ao uso de faixas de frequências *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), abaixo de 1 GHz (CENTENARO et al., 2016). Tecnologias com essas características são conhecidas como *Low Power Wide Area Networks* (LPWANs). Atualmente existem diversas tecnologias LPWANs, mas algumas se destacam: NB-IoT, Sigfox e também a

tecnologia LoRaWAN (PETÄJÄJÄRVI et al., 2017). Dentre essas três tecnologias LPWANs, a única que possui um modelo de negócios aberto é a LoRaWAN (SOARES et al., 2018).

Considerando as inúmeras aplicações que podem ser desenvolvidas baseadas no conceito da IoT utilizando LoRaWAN, este trabalho propõe um estudo para a implantação dessa tecnologia no município de Pato Branco. Realizando diferentes tipos de testes em um ambiente urbano, como uma opção de comunicação, para posterior desenvolvimento de aplicações em Internet das Coisas e análise de viabilidade da rede.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho propõe um estudo teórico e prático da viabilidade do uso da tecnologia LoRaWAN em situações reais na cidade de Pato Branco, analisando o alcance e também a qualidade do sinal.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo proposto, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Implantar uma rede LoRaWAN para testes no município de Pato Branco;
- Avaliar o desempenho da comunicação, considerando a vazão, a perda de pacotes, potência do sinal e relação sinal-ruído de acordo com a distância entre os dispositivos finais e o *gateway*;
- Avaliar como o fator de espalhamento, largura de banda e taxa de codificação (*Coding Rate*), influenciam o desempenho da comunicação, em especial na vazão e perda de pacotes.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A LoRa Alliance é uma entidade internacional que trabalha no desenvolvimento de um padrão global para a IoT e também promove um padrão aberto para redes, chamada de LoRaWAN. O padrão LoRaWAN foi desenvolvido pela Semtech, e os proprietários da tecnologia do chip são: IBM Research e a Actility. A tecnologia LoRaWAN é de código aberto, o chip para os dispositivos tem baixo custo e também é de fácil instalação (ABINC, 2018).

Ao reduzir os custos, torna-se viável a criação de novos produtos e aplicações: monitoramento de vias públicas, rastreamento animal, agricultura de precisão, cidades

inteligentes, entre outros. A IoT a cada dia que passa, é mais popular e viável nestes meios, devido ao fato de englobar análise e inteligência de dados (NUNES, 2017). Neste sentido, a rede LoRa é popular na área de aplicações de IoT e tem alcançado bastante aprovação ao redor do mundo (LORA ALLIANCE, 2018a).

Conforme destacado pela ABINC (2017), em 21 de junho de 2017, a ANATEL alterou a lei para aprovar redes LoRaWAN, permitindo que os equipamentos sejam certificados e operem em potências compatíveis com as existentes no exterior, colocando o Brasil em condições de igualdade com os países de vanguarda em IoT. Conforme cita Centenaro et al. (2016), uma rede LPWAN, categoria de classificação de redes na qual a LoRaWAN se encontra, opera em faixas de frequências de banda não licenciadas. Nos Estados Unidos da América (EUA) as faixas a serem utilizadas são 169 MHz, 433 MHz e 868/915 MHz, dependendo da região de operação. Na Europa utiliza-se a faixa de frequência de 868 MHz. Já no Brasil, a faixa de frequência utilizada, regulamentada pela (ANATEL, 2018), é de 902 MHz a 907,5 MHz e de 915 MHz a 928 MHz. Vale ressaltar que existem outras faixas de frequências não licenciadas, as aqui citadas, são utilizadas pela rede LoRa.

Considerando uma largura de banda de 125 kHz, taxa de erro de pacote de 1%, com *bitrate* de 290 bps o alcance da rede pode chegar até a 14 km (DUCROT et al., 2016). Alguns estudos mostram que a tecnologia LoRaWAN permite uma taxa de transmissão de até 50 kbps alcançando uma distância de 12 km em zonas rurais e até 4 km em zonas urbanas (JUNIOR, 2017). Essa tecnologia otimiza a taxa de dados de comunicação para minimizar o tempo de antena e o consumo de energia dos dispositivos (DUCROT et al., 2016). Comparando com a taxa de dados de outras tecnologias LPWAN, essa otimização reduz o consumo médio de energia de um objeto conectado por um fator de 100 (DUCROT et al., 2016). Em função disto, muitas aplicações estão sendo propostas, algumas delas são descritas no parágrafo seguinte.

Um exemplo de aplicação considerando a área rural, é o rastreamento bovino. Essa implementação se baseia na comunicação LoRaWAN para permitir o rastreamento de gado em ambientes desprovidos de acesso à Internet, enviando a localização dos animais que utilizam colares, esses equipamentos são embarcados com a tecnologia LoRa (DIENG et al., 2017). Outro exemplo é o rastreamento de veículos. Essa aplicação permite acompanhar a localização e coletar informações sobre o automóvel. Quando esses dados são submetidos a análises de *big data* e Inteligência Artificial (IA), torna-se possível detectar de forma automática furtos, roubos, colisões e falhas mecânicas bem como comparar em tempo real determinada anomalia com o histórico de comportamento do veículo em questão. Uma aplicação da rede LoRaWAN bastante popular é o monitoramento de medidores inteligentes, que são dispositivos que registram

informações como consumo de energia elétrica, níveis de tensão, corrente e fator de potência (SANTOS; MOTA, 2020).

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade de um estudo tanto teórico quanto prático mais aprofundado da tecnologia LoRaWAN em casos de estudo reais, neste caso, na zona urbana do município de Pato Branco. Tem como objetivo caracterizar as limitações da rede no município, bem como avaliar a viabilidade desta tecnologia na cidade por meio de análise de alcance e qualidade de sinal, como forma de contribuição para o desenvolvimento da cidade.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é composta por 5 (cinco) capítulos. O primeiro, apresenta as considerações iniciais, objetivos, justificativa e a estrutura do trabalho. No segundo capítulo é apresentado o referencial teórico, contendo conceitos sobre IoT, tecnologias de comunicação, protocolos de comunicação bem como aplicações. O terceiro capítulo diz respeito aos materiais e métodos do presente trabalho. Já no quarto capítulo consta a análise e discussão dos resultados obtidos. Por fim, no quinto capítulo é composto pela conclusão deste trabalho.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico deste trabalho é abordado o termo de Internet das Coisas (IoT), tecnologias de comunicação, protocolo LoRaWAN, bem como alguns trabalhos relacionados.

### 2.1 INTERNET DAS COISAS

O termo IoT é amplamente discutido, tendo em vista o crescente número de dispositivos que necessitam de acesso, principalmente, sem fio. Conforme Ashton (2009), ele foi o primeiro a utilizar esse termo, com o intuito de dizer que, tanto os computadores quanto a Internet, dependem dos seres humanos para obter informações. De forma resumida pode-se definir IoT da seguinte forma: conjunto de objetos que podem se conectar à Internet utilizando protocolos de rede. Segundo Ashton (2009), a IoT tem o potencial para mudar o mundo, assim como a Internet. E esse potencial pode ser empregado em todas as áreas, melhorando a qualidade de vida e desempenhando um papel notável no mundo.

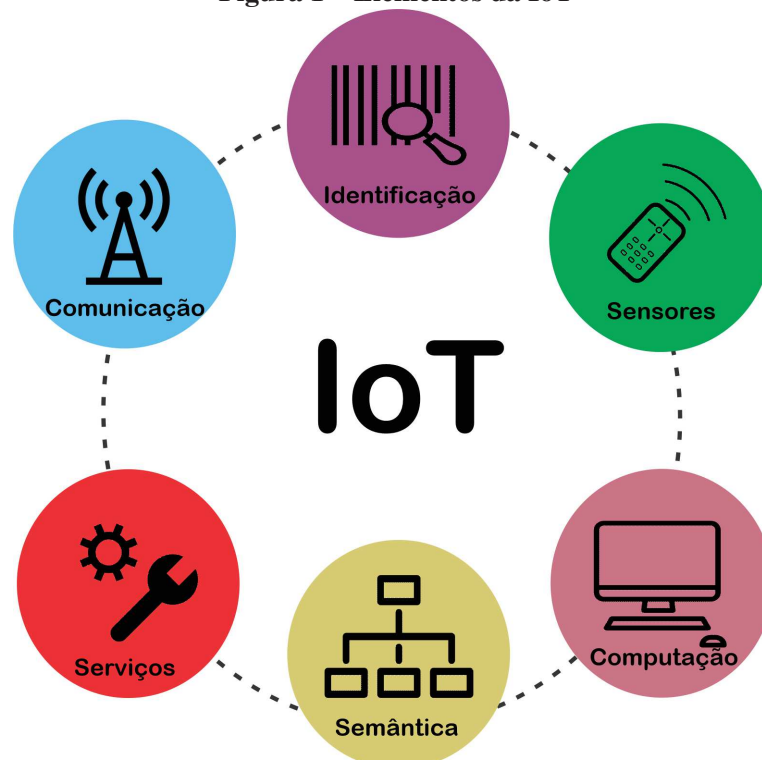
Quando combina-se a Internet com outras tecnologias, como sensores, pode-se dizer que, o que antes era simplesmente um objeto, se torna um dispositivo inteligente. Um dispositivo inteligente detecta, computa e se comunica via Internet (GUBBI et al., 2013). Ao conectar esses dispositivos à rede, e ao receber informações, pode-se controlá-los remotamente ou então utilizar servidores, permitindo que os objetos reconheçam os eventos e modifiquem seu estado sem a necessidade de intervenção humana (KORTUEM et al., 2010). Além dos dispositivos inteligentes, também são necessários protocolos para comunicação entre os objetos heterogêneos (aplicativos, veículos, dispositivos, etc).

Conforme Al-Fuqaha et al. (2015) e Santos et al. (2016) existem seis elementos que compõem a IoT, ilustrados na Figura 1 e descritos a seguir:

- Métodos de identificação: responsável por identificar de forma única cada objeto e conectá-los à Internet. Aborda também, as tecnologias que podem ser utilizadas para identificar os objetos, fornecendo uma identidade clara para cada objeto dentro da rede;
- Sensores/Atuadores: um sensor de IoT coleta os dados de objetos relacionados na rede e os envia para um Banco de Dados (BD) ou para a nuvem. Já os atuadores podem manipular o ambiente ou reagir de acordo com os dados lidos pelos sensores;

- **Comunicação:** as tecnologias de comunicação da IoT conectam objetos heterogêneos para fornecer serviços inteligentes específicos. Também diz respeito às diversas técnicas utilizadas para conectar os objetos inteligentes. Este trabalho é focado nesse item;
- **Computação:** esse item diz respeito a unidades de processamento (por exemplo: microcontroladores, processadores, microprocessadores) que são responsáveis por executar algoritmos nos objetos inteligentes e aplicativos que representam a capacidade computacional da IoT;
- **Serviços:** os serviços da IoT são divididos em diversas classes, como serviços de identificação (de interesse do usuário), serviços de agregação de dados (coletam e classificam os dados obtidos dos objetos inteligentes), serviços de colaboração e inteligência (reage e toma decisões perante o cenário obtido do serviço de agregação de dados) e também serviços de ubiquidade (prover serviços de colaboração e inteligência em qualquer momento e qualquer lugar que sejam necessários);
- **Semântica:** diz respeito a capacidade de extrair conhecimento por diferentes máquinas para fornecer os serviços necessários, bem como descobrir e utilizar recursos e informações de modelagem.

**Figura 1 – Elementos da IoT**



Fonte: Autoria própria

As aplicações utilizando IoT são das mais diversas: transporte, saúde, automação industrial e também, pode ser uma resposta às emergências a desastres naturais, inclusive desastres que são causados pelo homem, em que as decisões humanas se tornam difíceis (AL-FUQAHA et al., 2015). Um bom exemplo são as casas inteligentes, que podem tanto abrir uma garagem automaticamente, abrir e fechar cortinas, quanto controlar a temperatura do ambiente. Uma casa inteligente é caracterizada por possuir múltiplos dispositivos que são conectados uns aos outros via redes locais ou redes locais sem fio, posteriormente, essas redes locais são conectadas com a Internet (JIANG, 2004). Outra aplicação que vem ganhando bastante espaço hoje são as cidades inteligentes (*smart cities*). Segundo ZANELLA et al. (2014), cidades inteligentes são cidades planejadas com processos eficientes e projetados para beneficiarem os locais em que são aplicados com o objetivo de fazer um melhor uso dos recursos públicos, aumentando a qualidade dos serviços oferecidos aos cidadãos, reduzindo ao mesmo tempo, custos operacionais das administrações públicas. Essas cidades tem participação governamental, em aspectos sociais e humanos, por exemplo. Nessas cidades são realizadas experiências, e também é feito um uso intensivo de diversos tipos de tecnologia, usando, principalmente, dispositivos inteligentes, que gerenciam de forma inteligente os recursos naturais, auxiliando de forma econômica e sustentável.

Para que todas essas aplicações sejam efetivadas da melhor forma possível, busca-se tecnologias de comunicação mais atualizadas e que forneçam longo alcance, baixo consumo de energia e demais características pertinentes à cada aplicação em que a tecnologia é aplicada. Na próxima seção são abordadas as tecnologias de comunicação mais utilizadas no ramo de IoT.

## 2.2 TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO

Na IoT, os dispositivos se conectam às redes locais, para posteriormente serem conectadas com a Internet, geralmente, por meio de redes sem fio, que descarta a necessidade de cabeamento. Algumas tecnologias de comunicação sem fio que podem ser usadas na IoT são descritas a seguir.

### 2.2.1 WI-FI

A Wi-Fi é um padrão conhecido, segue as normas do padrão IEEE 802.11. Utiliza frequências de rádio na faixa de 2,4 e 5 GHz sendo capaz de transmitir dados a até 100 metros de distância (SANTOS et al., 2016). Atualmente, segundo Wi-Fi Alliance (2019), a nova era, chamada de Wi-Fi 6, as frequências de rádio utilizada corresponde a 2,4 GHz e 5

GHz, com uma taxa de transferência de 9,6 Gbps. As faixas de frequências que são utilizadas, são conhecidas como não licenciadas ISM, que são bandas reservadas internacionalmente para o desenvolvimento Industrial, Científico e Médico. As bandas ISM podem ser usadas sem licença e estão sujeitas a um conjunto de regras que estão relacionadas com a potência máxima transmitida e com a largura de banda, que deve ser mantida dentro de uma faixa de 2,400 GHz à 2,4835 GHz com uma largura de banda de 83,5 MHz, no espectro de 2,5 GHz, por exemplo. Essas faixas de frequência são classificadas pela ANATEL. As frequências licenciadas são restritas a determinadas regiões, e é necessário o pagamento de taxas para obter o direito de uso, assim, a ANATEL garante que outros equipamentos não irão operar na mesma frequência. O Wi-Fi proporciona um excelente meio pelo qual diversos dispositivos podem se conectar à uma rede. Porém, tem alto consumo energético e curto alcance, por isso, novos padrões foram desenvolvidos, e são abordados a seguir.

### 2.2.2 4G/LTE

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), é uma tecnologia de quarta geração (4G), no Brasil, essas tecnologias (4G e LTE) não apresentam diferenças consideráveis. É uma tecnologia móvel de transmissão de dados em bandas ultra largas. Em setembro de 2014 a ANATEL licitou a faixa de frequência de 698 MHz a 806 MHz para a implantação de 4G/LTE com uma taxa de transferência de 300 Mbps. Essa tecnologia apresenta um alcance melhor em relação a Wi-Fi, porém o consumo energético é maior. Utiliza faixas de frequências licenciadas, ou seja, deve ser pago uma taxa para a utilização dessa tecnologia. As empresas que adquiriram frequências dentro dessa faixa são: Vivo, Tim, Claro, Oi, Sky e Sunrise.

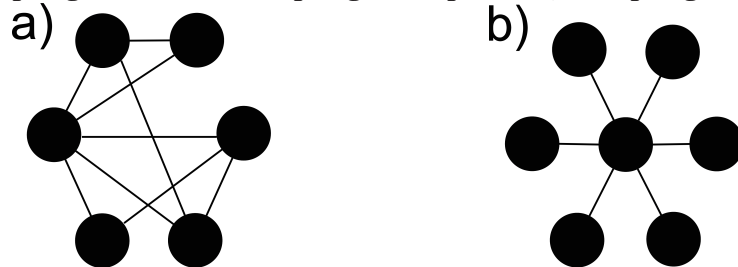
### 2.2.3 LR-WPAN

Redes LR-WPAN (*Low Rate - Wireless Personal Area Network*) são caracterizadas por baixo consumo de energia. Essa tecnologia, segundo Andreev et al. (2015), permite avaliar níveis de interferências e ajustar o canal de comunicação. O padrão mais utilizado em redes LR-WPAN é o padrão IEEE 802.15.4. Dispositivos certificados por este padrão podem utilizar bandas de frequência disponíveis para operação que estão entre as faixas de 868 a 868,6 MHz, 902 a 928 MHz e 2400 a 2483.5 MHz (IEEE... , 2011).

O padrão IEEE 802.15.4 é um padrão IEEE que especifica a camada física e efetua o controle de acesso para redes sem fio pessoais de baixa taxa de transmissão, desenvolvido para prolongar a bateria de dispositivos. As taxas de transmissão podem chegar a até 250 kbps. A LR-WPAN tem baixa potência e curto alcance, aproximadamente 100 metros, permite

trabalhar com topologias de rede estrela (toda a informação deve passar obrigatoriamente por uma estação central, que está conectada a cada estação de rede para distribuir o tráfego, para que uma estação não receba o que não é destinada à ela) ou topologia *mesh* (os computadores e redes locais interligam-se entre si, ponto a ponto, com o uso de cabos e dispositivos de interligação, permitindo que existam diferentes tipos de caminhos para chegar ao destino). A topologia *mesh* se diferencia pelo fato de que os nós podem se comunicar entre eles de forma autoconfigurável e auto-organizável criando e mantendo automaticamente a conectividade (ANDREEV et al., 2015). Já na topologia do tipo estrela os nós são ligados diretamente ao *gateway*. As topologias estão representadas na Figura 2.

**Figura 2 – Topologias de rede: a) Topologia do tipo *Mesh*, b) Topologia do tipo Estrela**



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, foi desenvolvido o padrão LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), que surgiu para suprir a demanda por dispositivos inteligentes conectados à rede, levando em conta o maior alcance dos dispositivos finais, bem como eficiência energética. As principais diferenças entre as redes LR-WPAN e a LPWAN se dão, principalmente, no alcance e na taxa de transferência de dados. Conforme IEEE... (2016), enquanto na LR-WPAN o alcance é de apenas 100 metros, na LPWAN o alcance pode chegar a até 50 km. A taxa de transferência da rede LR-WPAN chega, no máximo, até 250 kbps (IEEE... , 2016). Já nas redes do tipo LPWAN podem alcançar uma taxa de transferência de 375 kbps (RAZA et al., 2017).

#### 2.2.4 LPWAN

As redes LPWAN oferecem à IoT uma cobertura de longo alcance podendo chegar a 50 km, possibilitando que sensores ao longo de uma área se conectem às aplicações. Em geral, essas redes utilizam técnicas de modulação espectral e uso de bandas Sub-GHz (rede com pouco congestionamento), isso faz com que a comunicação se torne robusta e confiável, mesmo que a frequência seja baixa (RAZA et al., 2017). A arquitetura da LPWAN é do tipo ponto-a-multiponto (estrela), que faz com que se alcance vários dispositivos simultâneos a partir de um ponto com posicionamento estratégico.

As redes LPWANs são capazes de conectar milhões de dispositivos de baixo custo, com redes de melhor cobertura implicando em um custo de conexão menor, permitindo instalação em locais remotos e também menor consumo de bateria. São redes dedicadas à aplicações de IoT e um de seus requisitos é que não podem ter baixa latência na transmissão dos dados (AUGUSTIN et al., 2016). Várias redes são baseadas em LPWANs, algumas são abordadas a seguir.

#### 2.2.4.1 SIGFOX

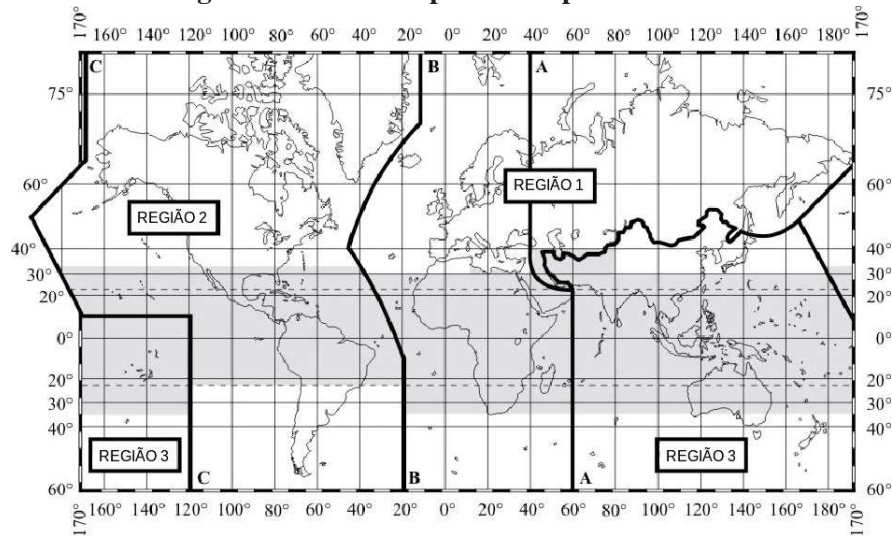
A Sigfox foi a primeira tecnologia LPWAN no mercado de IoT, desenvolvida por uma empresa francesa no ano de 2009. Não é uma tecnologia presente no Brasil, e para se desenvolver projetos com ela, é necessário que ela esteja implantada em algum lugar próximo. Por ser uma tecnologia proprietária, em que há necessidade de pagamento de licença, as informações dessa tecnologia são reservadas, tendo pouca documentação disponível publicamente (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017). Essa tecnologia opera como redes de comunicação móvel de banda *Ultra narrow* (canal com largura de banda muito estreita), tendo capacidade para que um *gateway* consiga lidar com um milhão de objetos conectados, em uma área de cobertura de até 50 km em zonas rurais de até 10 km em zonas urbanas, porém com uma quantidade reduzida de informações, limitadas a 140 por dia (AUGUSTIN et al., 2016). Essa tecnologia é uma concorrente da tecnologia LoRa. Optou-se por não utilizar essa tecnologia devido ao fato de ser uma tecnologia proprietária, ter um número de mensagens limitado a 140 por dia e também pela dificuldade de acesso da tecnologia na região.

#### 2.2.4.2 LORA

A rede LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia desenvolvida pela Cycleo, uma empresa francesa, que posteriormente foi adquirida pela Semtech. Utiliza uma técnica de modulação que pertence a LoRa Alliance, derivada da CSS (*Chirp Spread Spectrum Modulation*) na camada física e também suporta FEC (*Forward Error Correction* - método de correção de erros na transmissão de dados via canais de comunicação ruidosos) (SEMTECH CORPORATION, 2015b). A camada física (PHY - *Physical Layer*) é responsável por modular sinais em sub-bandas de rádio em faixas de frequências não licenciadas ISM. Segundo a ANATEL (2018) a faixa utilizada no Brasil é de 902MHz a 907,5 MHz e 915 MHz à 928 MHz. A taxa de transmissão é de até 5,55 Kbps, e um alcance de até 15 km em zonas rurais, e 5 km em zonas urbanas (SOARES et al., 2018). De acordo com Teixeira e Almeida (2017) o planeta Terra é dividido em três regiões espectrais pela ITU (*International Telecommunications Union*), para

uma melhor administração dos espectros. Essa divisão pode ser observada na Figura 3.

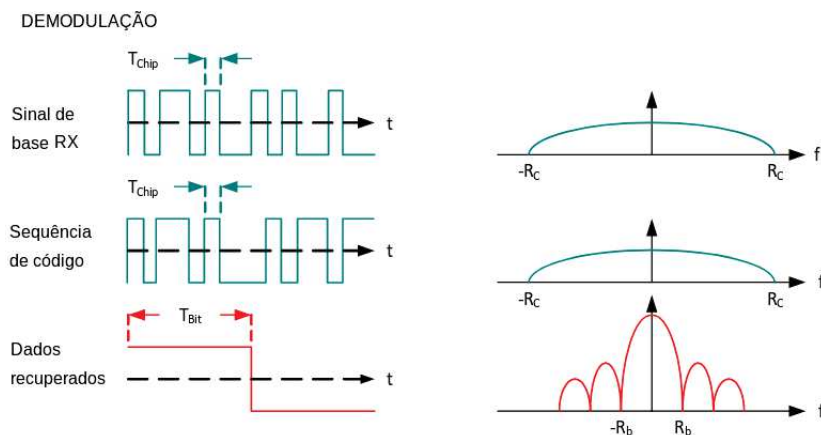
**Figura 3 – Divisão espectral do planeta Terra**



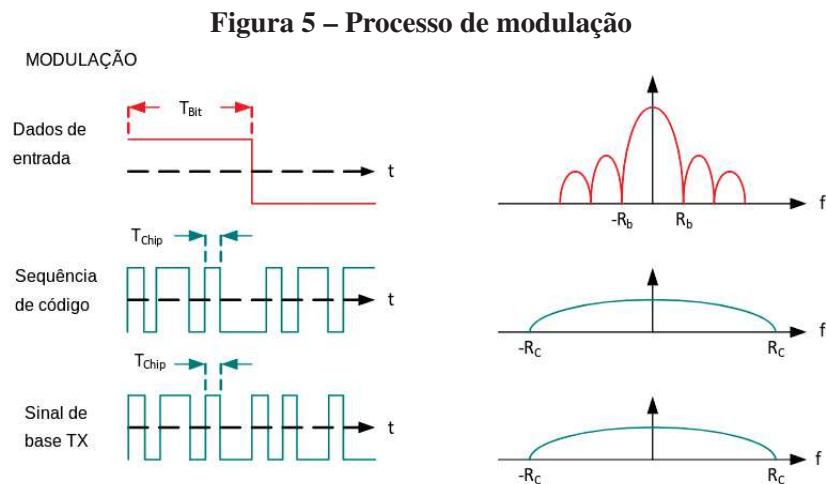
Fonte: Adaptado de (TEIXEIRA; ALMEIDA, 2017)

Esse tipo de modulação, utiliza um sinal de frequência que varia linearmente ao longo do tempo para codificar as informações. Devido à essa linearidade nos pulsos de sinais, os desvios entre o receptor e o transmissor são eliminados no processo de decodificação, observado na Figura 4, tornando essa modulação, observada na Figura 5, imune ao efeito Doppler (fenômeno físico observado nas ondas, quando são emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento em relação ao observador). Augustin et al. (2016) afirma que o deslocamento de frequência entre o transmissor e o receptor pode atingir 20% da (BW - Bandwidth) sem afetar o desempenho da decodificação, isso ajuda a reduzir o preço dos transmissores, pois faz com que os cristais embutidos nos transmissores não necessitem de extrema precisão.

**Figura 4 – Processo de demodulação**



Fonte: Adaptado de (SEMTECH CORPORATION, 2015a)



Fonte: Adaptado de (SEMTECH CORPORATION, 2015a)

Conforme Augustin et al. (2016), a técnica utilizada nas redes LoRa consiste em espalhamento espectral, isto é, um sinal em que a BW utilizada é maior do que a banda mínima necessária para transmitir a informação. Quanto maior BW (pode ter os valores de 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz), maior a taxa de dados, então, o sinal é espalhado à uma BW consideravelmente maior do que a original, isso permite uma resistência maior às possíveis interferências. Conforme Honório (2018), a modulação LoRa utiliza parâmetros como:

- Fator de espalhamento (*Spreading Factor* - SF): determina o código de espalhamento, que é uma razão entre a taxa de símbolos e a taxa de *chirp*, formando canais ortogonais em que não ocorra colisões. Quanto maior o SF, que podem ser de 7 à 12, maior é a relação sinal-ruído (SNR), sensibilidade, bem como o alcance. Para melhorar a SNR símbolos são formados em função da quantidade de *chirps*, isso faz com que o receptor não precise decodificar todos os *chirps* para aumentar o SF, apenas as amostras que estiverem com melhor SNR, mas isso trás um custo em relação ao tempo de propagação no ar do pacote e também na potência média por bit;
- Taxa de código (*Coding Rate* - CR): responsável por auxiliar na identificação e correção de erros da mensagem durante uma transmissão. Esse parâmetro utiliza um código de bloco linear Hamming (8,4), que garante que bytes repetidos são representados de outra maneira que diferente da tabela de codificação anterior. Estes códigos corretores de erros estão embutidos no modem do LoRa, quanto mais paridade no bit, maior a robustez da comunicação, mas isso também acarreta custos em relação ao tempo de propagação da mensagem e afeta a taxa efetiva de bits.

Quando combina-se ambos os parâmetros com a BW do sinal e a potência de



transmissão (TP) que é ajustável de 2 dBm até 14 dBm dependendo do modelo do rádio, pode-se determinar o alcance dessa comunicação. Os parâmetros da SF e CR também definem o tamanho da mensagem. Ao configurar a TP, a frequência da portadora (CF - *Carrier Frequency*) - que é ajustável conforme a região de operação dos equipamentos, o SF, a BW e o CR pode-se determinar o consumo de energia, a faixa de transmissão bem como a resistência à ruídos.

Conforme Semtech Corporation (2015a) pode-se obter a taxa de codificação  $T_c$ , considerando o CR com valores de 1 (um) à 4 (quatro), tem-se a Equação 1.

$$T_c = \frac{4}{4 + CR} \quad (1)$$

Para as especificações do parâmetro de fator de espalhamento segundo a Semtech Corporation (2015a) são definidos 6 (seis) valores diferentes: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11, SF12. Com esses valores, o valor obtido na Equação 1 e a BW, pode-se definir uma taxa de transmissão teórica ( $R_b$ ) vista na Equação 2.

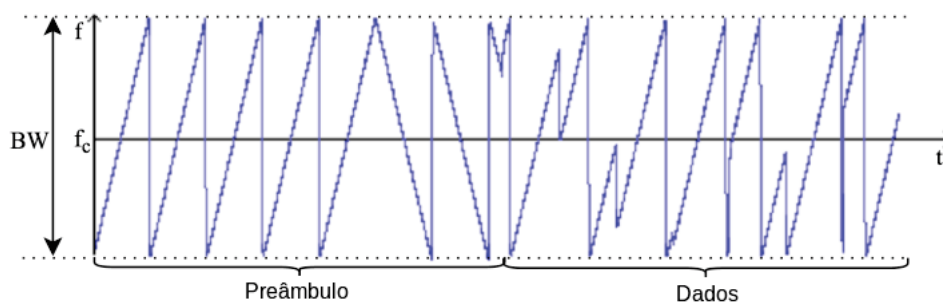
$$R_b = SF \cdot \frac{T_c}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (2)$$

Reorganizado os termos da Equação 2, tem-se:

$$R_b = SF \cdot \frac{T_c \cdot BW}{2^{SF}} \quad (3)$$

Esses parâmetros influenciam a taxa de bits da modulação, sua resistência a ruídos e sua facilidade de decodificação (AUGUSTIN et al., 2016). A Figura 6 fornece um exemplo de transmissão LoRa, mostrando variação de frequência ao longo do tempo. A posição dessa descontinuidade em frequência é o que codifica as informações transmitidas.

**Figura 6 – Variação de frequência ao longo do tempo de um sinal de amostra emitido por um transmissor LoRa**



Fonte: Adaptado de (AUGUSTIN et al., 2016)

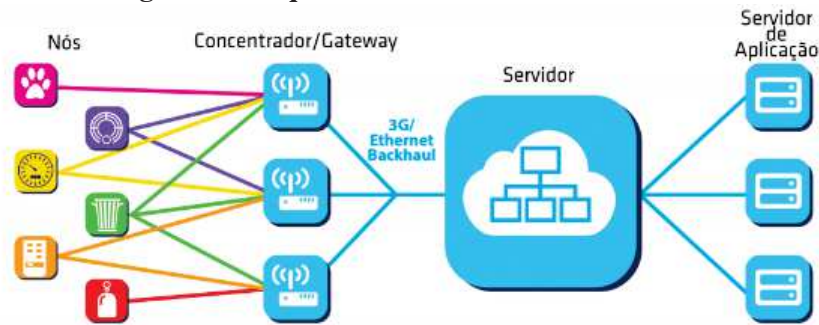
As características que mais se destacam da rede LoRa são: longo alcance, robustez, eficiência energética e o fato de ser resistente a interferências. Com o crescimento da tecnologia LoRa, tornou-se interessante criar uma padronização para otimizar o uso da tecnologia. Por conta disso foi criada a LoRa Alliance, para padronizar a tecnologia via protocolo LoRaWAN. Os protocolos de comunicação são um conjunto de regras, que dizem como deve ser a sintaxe, a semântica, bem como a sincronização que torna possível a troca de mensagens. São responsáveis por autenticar, detectar e corrigir erros de mensagens. Possuem dados para realizar uma transmissão, como, por exemplo: tamanho de pacote, técnicas de sincronização, rotas, velocidade, etc. Apesar da tecnologia LoRa ser limitada devido aos circuitos de modulação serem uma tecnologia proprietária da Semtech, o protocolo LoRaWAN é aberto. A seguir são abordados os detalhes do protocolo LoRaWAN.

#### 2.2.4.3 LORAWAN

O protocolo LoRaWAN, assim como outros protocolos de comunicação, cumpre requisitos fundamentais de IoT, como: comunicação bidirecional segura, qualidade de serviço (QoS), ajuste de potência para maximizar a duração das baterias. LoRaWAN é um protocolo aberto de comunicação que funciona sobre a camada física da rede LoRa, e define a arquitetura do sistema e parâmetros de comunicação e de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC). É um protocolo que foi desenvolvido e mantido pela LoRa Alliance com o intuito de padronizar a rede LoRa, que é uma associação sem fins lucrativos formada por grandes empresas como IBM, Cisco, Google, e entre outras.

A topologia da rede LoRa é do tipo estrela, conforme afirma LORA ALLIANCE (2015), vários dispositivos são conectados a um *gateway*. As redes em estrela diminuem o tráfego de rede quando se trata de roteamento de informações, se comparadas às outras topologias. Essa topologia de rede possui basicamente quatro elementos, que são: dispositivos finais (sensores que utilizam a modulação LoRa para se conectar aos servidores de rede via *gateway* em que o tipo de comunicação é bi-direcional, ou seja, pode transmitir e receber dados), *gateways* (responsável por conectar os dispositivos finais com os servidores de rede, organizando-os e repassando-os via TCP/IP), servidores de rede (responsáveis por gerenciar, filtrar, remover os pacotes duplicados e checar a segurança dos dados que chega dos *gateways*), e por fim os servidores de aplicação (responsáveis pelos serviços ligados ao usuário final). Na Figura 7 pode-se observar a arquitetura de uma rede LoRaWAN, cada nó é um dispositivo dotado de um módulo LoRa que transmite e recebe sinais aos *gateways*. Estes, por sua vez, recebem as informações dos dispositivos e transmitem para um servidor local ou remoto.

**Figura 7 – Arquitetura de uma rede LoRaWAN**



Fonte: Adaptado de (LORA ALLIANCE, 2015)

O protocolo LoRaWAN, conforme LORA ALLIANCE (2015), possui três classes diferentes de nós finais (*end-devices*) para atender às diferentes necessidades nas aplicações LoRaWAN, que são:

- Classe A (Dispositivos finais bidirecionais de menor potência): a comunicação de classe A é sempre iniciada pelo dispositivo final e é totalmente assíncrona. Cada transmissão (*uplink*) pode ser enviada a qualquer momento e é seguida por duas janelas curtas de recepção (*downlink*), oferecendo a oportunidade de comunicação bidirecional. O dispositivo final pode entrar no modo de suspensão de baixa energia pelo tempo que for definido por seu próprio aplicativo;
- Classe B (Dispositivos finais bidirecionais com latência determinística do *downlink*): a comunicação da classe B é bidirecional e além das janelas de recepção da classe A, abre novas janelas de recepção com tempo programado, isso fornece à rede a capacidade de enviar comunicações de *downlink* com uma latência determinística, mas a custo de algum consumo de energia adicional no dispositivo final. A latência é programável por até 128 segundos para se adequar a diferentes aplicações, e o consumo adicional de energia é baixo o suficiente para ser válido para aplicações alimentadas por bateria;
- Classe C (Dispositivos finais bidirecionais de menor latência): essa classe é formada por dispositivos com comunicação bidirecional com muitas janelas de recepção. Reduz ainda mais a latência no *downlink*, mantendo o receptor do dispositivo final aberto durante o tempo em que o dispositivo não está transmitindo (*half duplex*). Com base nisso, o servidor de rede pode iniciar uma transmissão de *downlink* a qualquer momento, supondo que o receptor do dispositivo final esteja aberto, sem latência. O comprometimento é o consumo de energia do receptor (até 50mW), portanto, a classe C é adequada para aplicações em que a energia contínua está disponível.

### 2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

A área de IoT é bastante ampla e proporciona à ciência diversos trabalhos e estudos com o intuito de melhorar a qualidade de vida dos seres humanos de forma econômica e sustentável com o desenvolvimento de novas tecnologias e dispositivos. Apesar da LoRa e da LoRaWAN serem tecnologias recentes, na literatura já pode-se encontrar alguns projetos tanto aplicando a tecnologia, que é mais comum, quanto projetos que estudam o funcionamento, explorando as suas características.

Um dos primeiros trabalhos responsáveis por fazer uma comparação entre diferentes tecnologias de redes de baixa potência e longo alcance, realizando uma descrição mais específica sobre a tecnologia LoRa, foi o dos autores Centenaro et al. (2016). O primeiro experimento realizado por eles é o de implantação da rede LoRa em um edifício de 19 andares, para controlar temperatura e umidade. Já o segundo experimento, é uma implantação de uma rede LoRa em uma área de  $100 \text{ km}^2$ , para realizar testes de análise de cobertura e de alcance. A conclusão obtida foi que com 30 *gateways* é possível cobrir uma área de até  $100 \text{ km}^2$ , e cada *gateway* suporta 7000 (sete mil) habitantes.

No trabalho realizado por Petäjäjärvi et al. (2017) são avaliadas métricas de desempenho ao qual utiliza um meio móvel como dispositivo final. Avaliaram-se também a taxa de entrega e a cobertura, em três cenários diferentes: nó se deslocando em um eixo horizontal, nó em um veículo comunicando-se com um receptor estático, nó em um ambiente veicular e um nó em um transporte aquático, com o intuito de relacionar o fator de espalhamento com as mudanças de potências.

Um dos trabalhos que pode-se citar também, é o trabalho de Soares et al. (2018) que tem como objetivo avaliar a cobertura de comunicação em redes elétricas e áreas urbanas utilizando a tecnologia LoRa para algumas aplicações em *smart grids*. Os autores realizaram diferentes tipos de testes como: propagação de sinais em ambiente urbano e também em ambiente suburbano, testaram-se também a disponibilidade de comunicação nesses ambientes, bem como a qualidade do sinal. Os resultados que obtiveram mostram que a rede LoRa se mostra promissora, pois atende uma ampla área com baixo custo para implantação bem como consumo energético.

A dissertação de mestrado de Ortiz (2018) é referente à uma análise de desempenho de uma rede LoRa. Analisou-se que com o crescente número de sensores, aumento de processamento e comunicação em cidades inteligentes, se torna necessária a avaliação devido a muitos dispositivos estarem conectados na mesma rede. O estudo do autor considerou a

vazão, taxa de perda de pacotes, potência de sinal e também sinal-ruído em função do fator de espalhamento, bem como a distância entre os dispositivos. Os resultados foram obtidos no *campus* da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) para uma distância de até 2000 m, com poucas fontes de interferência.

Conforme Rossato et al. (2020) a ideia do trabalho desenvolvido é implantar e avaliar uma rede sem-fio de longo alcance e baixa potência para cidades inteligentes. A tecnologia em que optaram para o estudo e implantação foi a tecnologia LoRaWAN na cidade de Toledo - Paraná. Depois de implantar a tecnologia realizou-se a avaliação considerando qualidade do sinal em diferentes pontos do município. Com a coleta dos dados práticos comparou-se com os valores teóricos obtidos por meio de simulação, e a partir dessas análises definiu-se um plano de expansão da rede LoRaWAN, tendo em vista que o município já possui algumas aplicações em desenvolvimento utilizando essa tecnologia.

Em 2020, Turcinovic et al. (2020) realizaram um estudo dos parâmetros LoRa em condições reais a fim de comparar com os valores teóricos descritos pela tecnologia, na Croácia. Os autores utilizaram 6.500 (seis mil e quinhentas) mensagens LoRa, teve como objetivo mostrar as dependências entre SF, RSSI, SNR e também entre o ToA (*Time on Air*) teórico e o valor obtido através dos testes. Segundo os autores o SF tem maior impacto na tecnologia, influenciando no consumo de energia, ToA e na cobertura da área.

### 3 METODOLOGIA

Com a demanda cada vez maior por conexão devido a alta quantidade de dispositivos no mundo atual, torna-se necessário a criação de métodos que possam conectar esses dispositivos à rede a uma longa distância e com baixo consumo de energia. Ao utilizar a rede LoRaWAN, pode-se solucionar esse problema, tendo em vista que é uma tecnologia de alto alcance e de código aberto. O presente projeto demonstra a implantação para testes de uma infraestrutura de dispositivos de IoT utilizando a rede LoRaWAN, com o intuito de avaliar a viabilidade da rede na zona urbana de Pato Branco. Este capítulo diz respeito aos materiais e métodos utilizados neste trabalho.

#### 3.1 MATERIAIS

Nas subseções a seguir são descritos os materiais a serem utilizados durante todo o desenvolvimento do presente trabalho.

##### 3.1.1 DISPOSITIVOS FINAIS

A avaliação da rede é feita utilizando dois dispositivos finais diferentes: um TTGO LoRa Neo-6M e um Módulo LoRaWAN RD49C. O TTGO LoRa Neo-6M possui um microcontrolador ESP32, que se comunica com o *gateway* utilizando a tecnologia LoRaWAN. O TTGO, que pode ser observado na Figura 8, possui algumas especificações como: *display* OLED, GPS integrado, chip LoRa SX1276, e a potência máxima de saída é de 20 dB em média. O dispositivo opera em faixas permitidas para uso no Brasil, que é de 915 MHz.

**Figura 8 – Módulo TTGO com GPS e antena**



Fonte: Autoria própria

O segundo dispositivo utilizado é o módulo LoRaWAN RD49C, fornecido pela empresa brasileira Radioenge. Esse módulo possui um chip LoRa SX1276, como esse dispositivo recebe comandos AT, acoplou-se um módulo base IoT-USB, que também é fornecido pela Radioenge, assim pode-se enviar mensagens LoRaWAN utilizando a porta USB de um computador. O módulo LoRaWAN RD49C acoplado ao módulo base IoT-USB pode ser observado na Figura 9.

**Figura 9 – Módulo LoRaWAN Radioenge acoplado com a interface USB**



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 1 mostra-se os custos para a aquisição dos dispositivos finais utilizados para realizar a avaliação da rede LoRaWAN no município de Pato Branco.

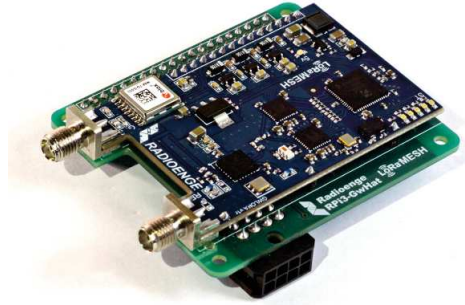
<b>Equipamento</b>	<b>Valor do produto (R\$)</b>	<b>Frete (R\$)</b>	<b>Total (R\$)</b>
Módulo LoRaWAN Radioenge RD49C	100,85	29,81	130,66
Módulo Base IoT-USB	93,19	0,00	93,19
Módulo TTGO LoRa Neo-6m	200,00	0,00	200,00
<b>Total (R\$)</b>			<b>423,85</b>

**Tabela 1 – Custo dos dispositivos finais**

### 3.1.2 GATEWAY

O *gateway* utilizado é produzido pela empresa brasileira Radioenge, e possui todos os elementos básicos necessários para a criação do protótipo de IoT. O *gateway* pode ser acoplado a um módulo Raspberry Pi 3, que tem como especificação um chip SX1301 LoRaWAN, que permite coletar e transferir dados entre todos os seus nós LoRa. O *gateway* acompanha uma antena GPS e uma antena omni direcional de 3 dBi, a antena pode ser substituída por uma antena de maior ganho, caso necessário. Para melhor preservação do equipamento, optou-se por armazená-lo em uma caixa hermética. Pode-se observar o *gateway* LoRaWAN na Figura 10. Este dispositivo é homologado pela ANATEL pela resolução 02053-18-07215.

**Figura 10 – Gateway Radioenge**



Fonte: Autoria própria

Os custos referentes a estes equipamentos constam na Tabela 2.

<b>Equipamento</b>	<b>Valor do produto (R\$)</b>
Gateway LoRaWAN	1.185,00
Raspberry Pi 3	400,00
Caixa Hermética	130,50
<b>Total (R\$)</b>	<b>1.715,50</b>

**Tabela 2 – Custos em relação ao gateway**

### 3.1.3 SERVIDOR DE REDE

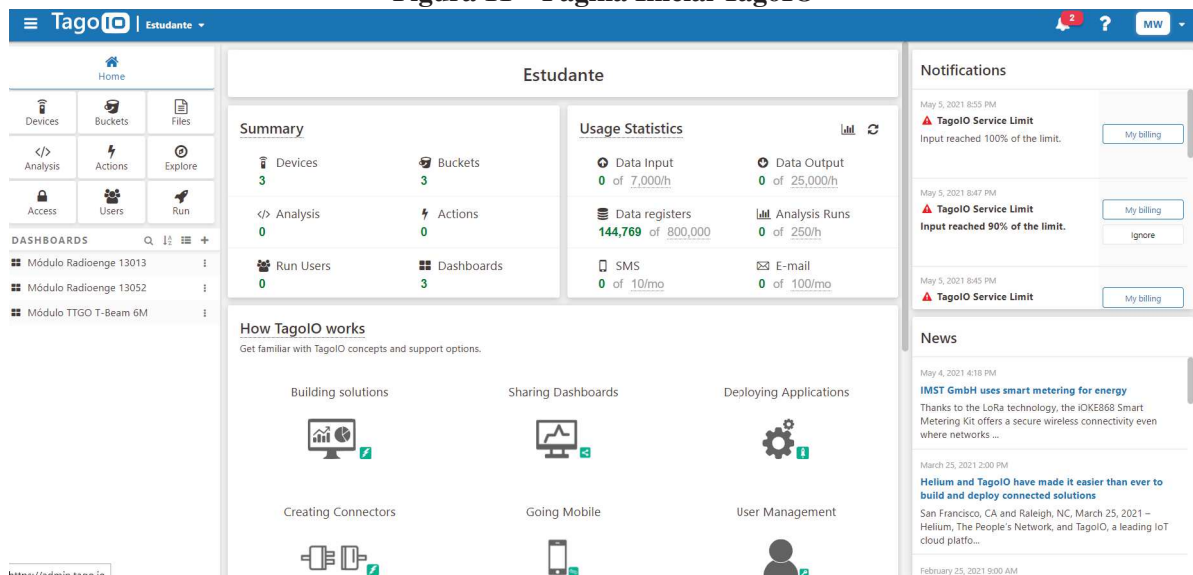
O servidor da TTN (*The Things Network*) é um projeto aberto, sem custos, e tem uma pilha de servidores de rede LoRaWAN robusta e flexível. Ao entrar no site da TTN ([www.thethingsnetwork.org](http://www.thethingsnetwork.org)) vê-se que os servidores de rede TTN são amplamente utilizados ao redor do mundo. Por ser um servidor de rede sem custos, aberto e amplamente utilizado optou-se por utilizá-lo como servidor de rede LoRaWAN neste projeto. No servidor TTN cadastrou-se tanto o *gateway*, dispositivos finais, quanto a integração com o servidor de aplicação. O servidor de rede TTN é hospedado na nuvem (dispensando a necessidade de estrutura física) e sem custos. Apesar de ter diversas vantagens, em alguns momentos ocorreu de o servidor TTN ficar indisponível, então, para usos em produtos com fins comerciais, têm-se a TTI (*The Things Industries*), por exemplo.



### 3.1.4 SERVIDOR DE APLICAÇÃO

O servidor de aplicação TagoIO é utilizado para armazenar os dados recebidos pelo servidor de rede TTN, também oferece uma interface mais amigável para o usuário, permitindo análises mais visuais. Assim como o servidor de rede TTN, é uma solução disponibilizada na nuvem, dispensando estruturas físicas. É uma plataforma gratuita para desenvolvedores de soluções para IoT, contando com aplicativos para dispositivos móveis Android e IOS. Também possui integração com o servidor de rede da TTN. Possui algumas limitações na versão gratuita, como a quantidade de dados que pode ser registrada (800.000 - oitocentos mil) e a quantidade de dados de entrada por hora (7.000 - sete mil dados por hora). A página inicial do servidor de aplicação pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Página Inicial TagoIO



Fonte: Autoria própria

Devido a limitação de entrada de dados e como forma de ter uma cópia de segurança, optou-se por utilizar um banco de dados hospedado no site Hostinger, na versão gratuita, para armazenamento de todos os dados recebidos pelo *gateway*. Para que esses dados fossem salvos em um banco, utilizou-se a integração HTTP com a TTN. Na Figura 12, pode ser observada a interface phpMyAdmin, utilizada para realizar as consultas no banco de dados criado, e podem ser observados todos os tipos de dados recebidos pelo *gateway* através do servidor de rede TTN. Para receber o HTTP POST da TTN, a integração HTTP envia os dados em formato JSON. O código PHP utilizado na interface phpMyAdmin, encontra-se no Apêndice A.

**Figura 12 – Banco de dados de pacotes recebidos pelo gateway**

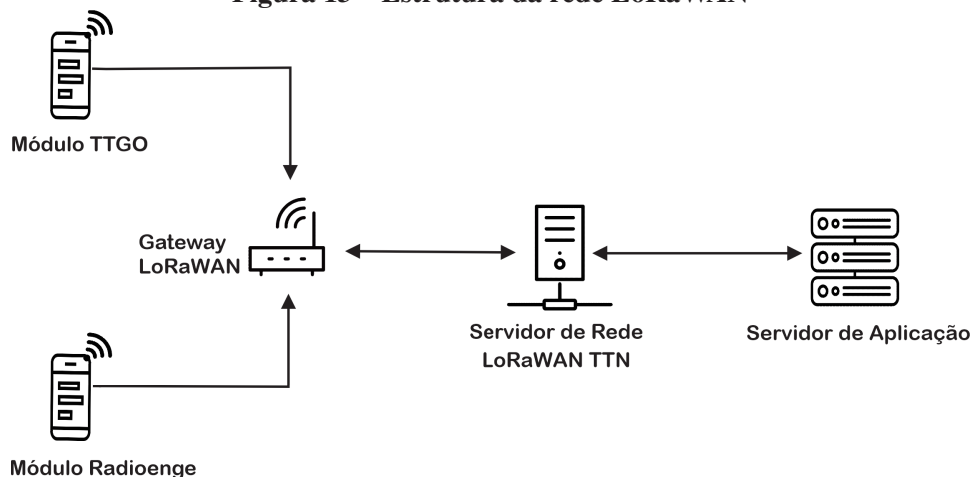
	id	contador	datarate	rssi	snr	datahora	frecuencia	payload	hw	timestamp
Edita Copiar Apagar	460	0	SF7BW125	-95	3	2021-05-05T23:01:35.908822804Z	916.8	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	2147483647
Edita Copiar Apagar	461	1	SF7BW125	-96	-3	2021-05-05T23:01:38.914882525Z	917.4	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	2147483647
Edita Copiar Apagar	462	0	SF10BW125	-95	-1	2021-05-05T23:16:03.277666979Z	916.8	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	724347980
Edita Copiar Apagar	463	1	SF7BW125	-91	-3	2021-05-05T23:16:05.942504674Z	917.2	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	727013963
Edita Copiar Apagar	464	2	SF7BW125	-90	-5	2021-05-05T23:16:08.698597632Z	917.8	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	729775004
Edita Copiar Apagar	465	3	SF7BW125	-94	-4	2021-05-05T23:16:11.7087221Z	916.8	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	732777971
Edita Copiar Apagar	466	5	SF7BW125	-96	-4	2021-05-05T23:16:17.716232289Z	916.8	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	738783915
Edita Copiar Apagar	467	6	SF7BW125	-93	-3	2021-05-05T23:16:20.715604949Z	917.6	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	741786883
Edita Copiar Apagar	468	7	SF7BW125	-93	-2	2021-05-05T23:16:23.715524719Z	918.2	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	744789844
Edita Copiar Apagar	469	8	SF7BW125	-94	-2	2021-05-05T23:16:26.722919734Z	917.4	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	747792819
Edita Copiar Apagar	470	10	SF8BW125	-92	-6	2021-05-05T23:16:32.828882525Z	918	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	753896292
Edita Copiar Apagar	471	11	SF8BW125	-93	-2	2021-05-05T23:16:35.824579714Z	917.2	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	756899268
Edita Copiar Apagar	472	12	SF8BW125	-94	-2	2021-05-05T23:16:38.831729224Z	917.6	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	759902244
Edita Copiar Apagar	473	14	SF8BW125	-94	-3	2021-05-05T23:16:44.84170826Z	917.4	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	765908180
Edita Copiar Apagar	474	15	SF8BW125	-93	-3	2021-05-05T23:16:47.848822804Z	917.2	VEVTVEUwMCgwMDApQUJDREVGROhJSKIMTU5PUFFSU1RVVldyYW...	00EBE274130CABB2	768911204

Fonte: Autoria própria

### 3.2 MÉTODO

A estrutura da rede LoRaWAN é dividida em quatro partes principais, que são: dispositivos finais (objetos que podem ser tanto sensores como atuadores), *gateway* (pode ser um ou mais dispositivos que conectam os dispositivos finais com a rede LoRaWAN), servidor de rede LoRaWAN (responsável por organizar a comunicação dos dispositivos com o servidor de aplicação) e por fim o servidor de aplicação (responsável por exibir as informações vindas dos dispositivos para o usuário final) (LORA ALLIANCE, 2017). A Figura 13 ilustra a estrutura da rede LoRaWAN montada.

**Figura 13 – Estrutura da rede LoRaWAN**

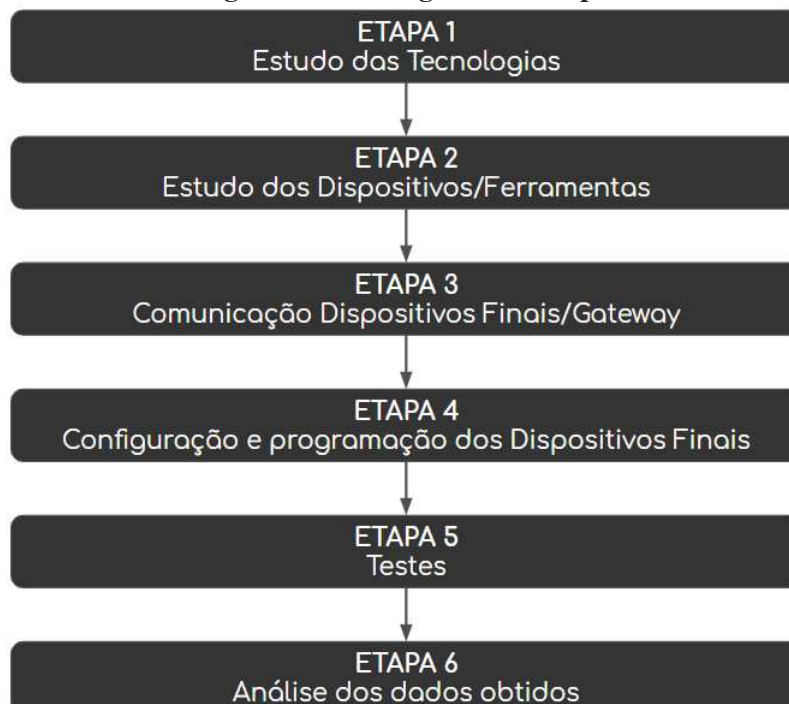


Fonte: Autoria própria

Os *gateways* retransmitem as mensagens para os dispositivos finais e também para um servidor de rede central. O servidor de rede por sua vez, encaminha os pacotes de cada dispositivo para o servidor de aplicativos associado. Para garantir as transmissões de maneira segura, o protocolo LoRaWAN conta com criptografia simétrica usando chaves de sessão derivadas das chaves raiz do dispositivo (LORA ALLIANCE, 2017).

Como procedimento de trabalho definiu-se as 6 etapas descritas a seguir, que também estão ilustradas na Figura 14. Na primeira etapa estudou-se a tecnologia LoRaWAN, quais as configurações permitidas para a região brasileira. Para fins de testes no município de Pato Branco, avaliou-se como a tecnologia pode funcionar considerando o relevo do município. Os dispositivos que seriam utilizados para o desenvolvimento deste projeto definiram-se na segunda etapa. Optou-se por dois dispositivos finais (TTGO e RD49C) e um *gateway* (Radioenge). Assim que os equipamentos chegaram, começou-se a estabelecer a comunicação entre os dispositivos finais e o *gateway*, realizada na terceira etapa. Na quarta etapa, iniciou-se a programação e configuração dos dispositivos finais e do *gateway*, conforme as configurações previamente definidas pelas especificações contidas no protocolo LoRaWAN 1.0.3 (LORA ALLIANCE, 2018b). Com todas as configurações e implementações finalizadas na quinta etapa, iniciou-se os testes em diferentes pontos no município de Pato Branco. Por fim, na etapa 6, com os dados já obtidos, realizou-se uma análise dos dados, para que fosse possível determinar se a tecnologia é viável ou não no município.

**Figura 14 – Fluxograma de etapas**



Fonte: Autoria própria

#### 4 IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA LORAWAN EM PATO BRANCO

Os experimentos para avaliar a tecnologia LoRa consistem em medições práticas de desempenho de comunicação, que considera a vazão, taxa de perda de pacotes, potência de sinal-ruído de acordo com a distância entre os dispositivos finais e *gateway* em função de diferentes configurações do fator de espalhamento, e também avaliar como o fator de espalhamento influencia o desempenho da comunicação dos dispositivos finais. Para realizar os testes é necessário uma unidade transmissora, que envia as mensagens e uma unidade receptora, que recebe mensagens. No caso deste projeto, a unidade transmissora são os dispositivos finais (Seção 3.1.1), e a unidade receptora é o *gateway* (Seção 3.1.2).

Com o intuito de avaliar o desempenho na zona urbana, instalou-se o *gateway* em uma cobertura no edifício Osvaldo Bukovski. Esse edifício foi escolhido por estar na área central de Pato Branco, e também porque se sobressai em altura sobre a maioria dos edifícios da cidade. Posteriormente, realizou-se a conexão do *gateway* com o servidor de rede LoRaWAN via Internet. Ao instalar o kit *gateway* nesse ponto, e conectá-lo à Internet para obter a conexão com o servidor de rede LoRaWAN, tornou-se possível realizar os testes com os dispositivos finais. A Figura 15 mostra o protótipo do *gateway* instalado.

**Figura 15 – Gateway instalado**



Fonte: Autoria própria

Os dispositivos finais podem ser observados na Figura 16. Esses dispositivos são posicionados em cima de um veículo, aproximadamente 1,5m de altura, e com distância de 10 cm entre eles.

**Figura 16 – Dispositivos finais**



Fonte: Autoria própria

A inicialização dos testes em cada dispositivo é diferente. Para o dispositivo RD49C, implementou-se uma interface, que mostra as etapas em que o dispositivo se encontra. Com o módulo USB acoplado ao dispositivo RD49C, enviou-se os comandos fornecidos pelo software desenvolvido. Inicialmente, o software identifica a porta em que o módulo está conectado, depois de conectado, é possível iniciar os testes. A tela do software mostra o teste que está sendo executado, o tempo entre cada pacote enviado, quando um pacote é enviado e demais informações recebidas pelo RD49C. A Figura 17 mostra o software de envio de comandos para o dispositivo RD49C.

**Figura 17 – Software de envio de comandos para o dispositivo RD49C**

```

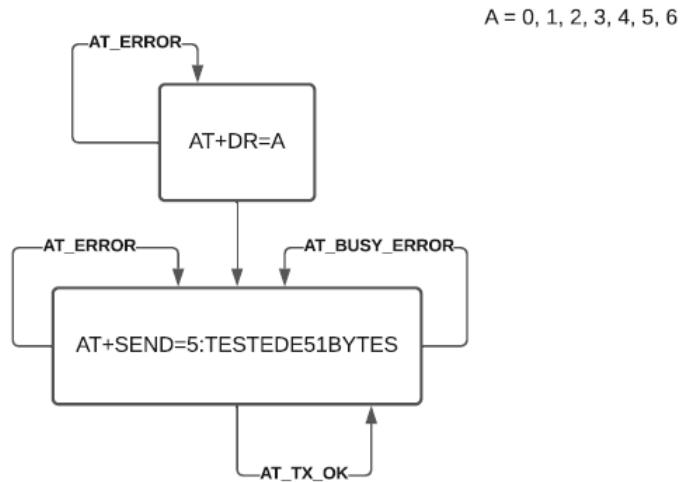
[00:00:00.000] ===== TESTE 1 =====
[00:00:00.004] Teste 1 iniciado
[00:00:00.005] Setando parâmetro AT+DR=0
[00:00:00.604] DR setado com sucesso
[00:00:00.605] Enviando pacote (1 de 10): AT+SEND=5:TESTE01(001)ABCDEFGHIJKLMNQRSTUWXYZ0123456789?#@
[00:00:05.606] ERROR -> Recebido: AT_NO_NETWORK_JOINED
[00:00:06.108] Reenviando pacote (1 de 10): AT+SEND=5:TESTE01(001)ABCDEFGHIJKLMNQRSTUWXYZ0123456789?#@
[00:00:11.109] ERROR -> Recebido: AT_NO_NETWORK_JOINED
[00:00:11.610] Reenviando pacote (1 de 10): AT+SEND=5:TESTE01(001)ABCDEFGHIJKLMNQRSTUWXYZ0123456789?#@
[00:00:16.610] ERROR -> Recebido: AT_NO_NETWORK_JOINED
[00:00:17.112] Reenviando pacote (1 de 10): AT+SEND=5:TESTE01(001)ABCDEFGHIJKLMNQRSTUWXYZ0123456789?#@
  
```

Fonte: Autoria própria

O dispositivo da TTGO inicia a comunicação com o *gateway* a partir do momento em que é alimentado, sem necessidade de outra intervenção. Assim que recebe a confirmação de comunicação com o *gateway*, os testes são iniciados. Na Figura 18 pode-se observar a máquina

de estados referente aos testes realizados, para cada DR (*Data Rate*) são enviados, via comando AT+SEND, 10 pacotes de 51 bytes, se ocorrer algum erro durante a transmissão do pacote, o dispositivo tenta novamente, até receber um AT\_TX\_OK.

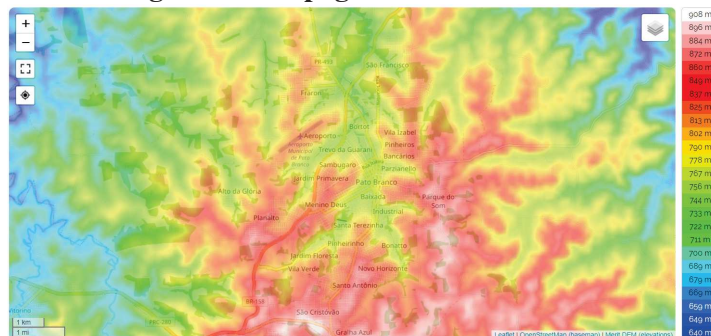
**Figura 18 – Máquina de estados de testes**



Fonte: Autoria própria

Para a realização dos testes, analisou-se a topografia da cidade de Pato Branco, que pode ser vista na Figura 19, tendo em vista que a cor vermelha indica pontos mais altos, e a azul pontos mais baixos em relação ao nível do mar. Nessa imagem, pode-se observar que o centro de Pato Branco está em uma região mais baixa que alguns bairros como Santo Antônio e Parque do Som, por exemplo.

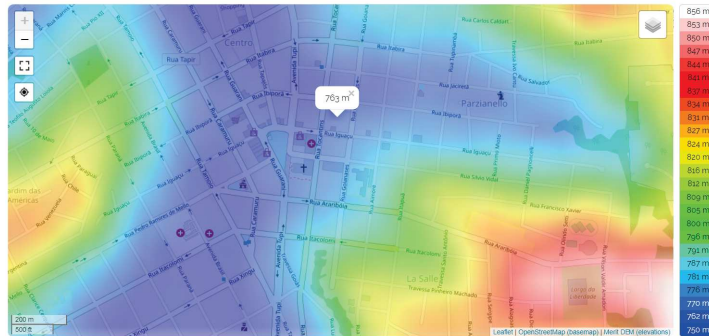
**Figura 19 – Topografia de Pato Branco**



Fonte: Adaptada de Google Maps

Ao analisar o ponto onde o *gateway* está instalado, na Figura 20, percebe-se que o centro de Pato Branco encontra-se em uma altitude baixa. O ponto de instalação do *gateway* está à 763m em relação ao nível do mar. Os mapas de topografia levam em conta somente o relevo e altitude da cidade, desconsiderando construções, árvores e demais fatores que podem influenciar em uma transmissão sem fio.

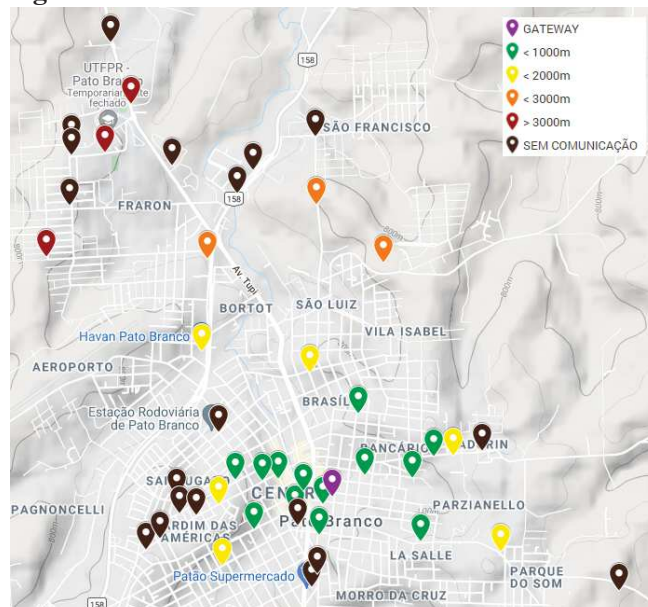
**Figura 20 – Topografia em torno do ponto de instalação do *gateway***



Fonte: Adaptada de Google Maps

A partir da análise de topografia e de testes preliminares, constatou-se a dificuldade de encontrar pontos em que a comunicação entre *gateway* e dispositivos finais fosse de qualidade, para que pudessem ser extraídos dados para análise. Considerando a topografia da cidade e análise visual da cidade levando em conta, edifícios, áreas arborizadas, definiu-se os pontos de testes que estão ilustrados na Figura 21. Optou-se por pontos com e sem visada para fins de análise e comparação. O *gateway* é identificado pelo ponto de cor roxa. Pontos de cor verde são os pontos em que a distância, em linha reta, do dispositivo final até o *gateway* é inferior a 1000 (mil) metros. Os pontos de cor amarela, são os pontos em que a distância é inferior a 2000 (dois mil) metros. Os pontos com coloração laranja são os pontos em que a distância é inferior a 3000 (três mil) metros. Já na cor vermelha, são os pontos em que a distância é superior à 3000 metros. Por fim, na cor marrom tem-se os pontos onde não houve comunicação entre o dispositivo final e o *gateway*.

**Figura 21 – Pontos de teste na cidade de Pato Branco**



Fonte: Adaptada de Google Maps

Na Tabela 3 tem-se a identificação dos pontos onde obteve-se comunicação entre os dispositivos finais e o *gateway*. Por ser uma área urbana, a maioria dos pontos de teste o *gateway* não tem visada. Inicialmente os testes foram realizados com uma diferença de 250 (duzentos e cinquenta) metros entre cada ponto, para as direções sul, oeste e leste. Para a região norte, o *gateway* estava com poucas obstruções, como construções e outras interferências, portanto optou-se por realizar testes com distâncias superiores a 1000 metros.

<b>ID</b>	<b>NOME</b>	<b>DISTÂNCIA (m)</b>
PT1	PAVILHÃO	115
PT2	BOB'S	275
PT3	TEATRO MUNICIPAL	360
PT4	PREFEITURA	370
PT5	JFPR	370
PT6	EMPÓRIO DO PÃO	530
PT7	SANEPAR	670
PT8	CENTRO ESPÍRITA	760
PT9	SARTORI	780
PT10	COLÉGIO MATERDEI	800
PT11	FÓRUM DO TRABALHADOR	900
PT12	LARGO DA LIBERDADE	915
PT13	AG AGROPECUÁRIA (MILHO)	1000
PT14	PIZZARIA ROCK PB	1050
PT15	CASTRO ALVES 1	1200
PT16	CASTRO ALVES 2	1200
PT17	ESCOLA CADORIN	1200
PT18	AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA	1200
PT19	RÁDIO CELIONAUTA	1700
PT20	HAVAN	1800
PT21	SHOPPING	2200
PT22	POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL	2500
PT23	TREVO DO PINHEIRO	2700
PT24	APARTAMENTO MAIRA	3500
PT25	BLOCO AGRONOMIA	3800
PT26	UTFPR/UAB	4000

**Tabela 3 – Pontos de Teste**

Na Tabela 4 pode-se observar os pontos em que tentou-se realizar a comunicação, porém, não houve resposta em nenhuma das 7 (sete) configurações possíveis. Esses testes foram realizados com o intuito de mapear possíveis pontos onde podem ser instalados outros *gateways* para que toda a cidade de Pato Branco possua comunicação LoRa para futuras aplicações. Os pontos sem comunicação, não possuem visada para o *gateway*, mesmo sendo em pontos mais altos. A partir dessa análise, é possível ter uma ideia de onde podem ser colocados *gateways* a fim de cobrir todo o município de Pato Branco com a rede LoRa.



ID	NOME	DISTÂNCIA (m)
PT27	SUBWAY	415
PT28	FAC. MATER DEI	750
PT29	PATÃO	855
PT30	RODOVIÁRIA	1200
PT31	CLÍNICA	1260
PT32	PRQ. RIO DAS PEDRAS 1	1410
PT33	PRQ. RIO DAS PEDRAS 2	1450
PT34	ASS. CADORIN	1450
PT35	EMPIRE	1650
PT36	PORTAL DO CÉU	2800
PT37	PLANTA GARDEN	2900
PT38	SEARA	3100
PT39	MORADA SÃO FRANCISCO	3300
PT40	BAIRRO SÃO FRANCISCO	3330
PT41	PRQ. ALVORECER	3400
PT42	MORRO UNIDEP	3600
PT43	PONTO DE ÔNIBUS HOTEL TEC.	3950
PT44	BAR DO IVO	4050
PT45	COOPERTRADIÇÃO	4650

**Tabela 4 – Pontos de Teste sem comunicação**

A cada transmissão realizada, para cada valor de DR programado, o dispositivo final (unidade transmissora) envia 10 (dez) pacotes com informações aleatórias (com números, letras e caracteres especiais), com 51 (cinquenta e um) bytes. Optou-se por utilizar dados aleatórios no pacote pois o dispositivo RD49C não suporta GPS, para fins de comparação tanto de hardware, quanto de configuração de DR, o ideal é que os dispositivos transmitam o pacote o mais semelhante possível. Cada valor de DR possui um tamanho máximo de *payload*, que pode ser observado na Tabela 5. Assim que o gateway recebe, ele retransmite para o servidor de rede LoRaWAN.

<i>Data Rate</i>	<b>Configuração</b>	<i>Payload</i> Máximo (bytes)
0	SF12/125kHz	51
1	SF11/125kHz	51
2	SF10/125kHz	51
3	SF9/125kHz	115
4	SF8/125kHz	222
5	SF7/125kHz	222
6	SF8/500kHz	222

**Tabela 5 – Relação entre *Data Rate* e o tamanho máximo de *payload***

Como visto na Tabela 5, o valor de DR pode variar de 0 à 6, conforme especificado no protocolo LoRaWAN 1.0.3, em que o DR = 0 refere-se a comunicação de maior alcance,

enquanto o DR = 6 a comunicação com menor alcance (LORA ALLIANCE, 2018b).

Com base nas especificações definidas pela LoRa Alliance, calcula-se os valores teóricos para  $T_c$  e  $R_b$ . Para calcular a taxa de codificação ( $T_c$ ), utiliza-se a Equação 1 (vide Seção 2.2.4.2), e considera-se a taxa de código (CR) igual a 1, (LORA ALLIANCE, 2018b). Então, obtêm-se:

$$T_c = \frac{4}{5} \quad (4)$$

Com a  $T_c$  calculada, considerando uma largura de banda (BW) de 125 kHz, pode-se obter os valores para a taxa de transmissão teórica ( $R_b$ ) em função do fator de espalhamento (SF). Substituindo na Equação 3, tem-se:

$$R_b = SF \cdot \frac{\frac{4}{5} \cdot 125k}{2^{SF}} \quad (5)$$

Como SF pode assumir 6 valores distintos, apresenta-se na Tabela 6, os valores de  $R_b$ , calculados teoricamente a partir da Equação 5.

SF	$R_b$ (bits/s)
SF7	5470
SF8	3125
SF9	1760
SF10	980
SF11	440
SF12	250

**Tabela 6 – Valores teóricos para a taxa de transmissão com CR = 1**

Conforme o DR fornecido pelas especificações na LoRa Alliance, tem-se que DR = 6 implica em um novo cálculo para  $R_b$ , pois a BW é 500kHz e apenas um SF, que é 12, então:

$$R_b = SF \cdot \frac{\frac{4}{5} \cdot 500k}{2^{SF}} = 12500bits/s \quad (6)$$

Segundo LORA ALLIANCE (2018b), quanto mais bits são destinados a CR, menor a taxa de transmissão, maior será a energia utilizada, e por consequência, potencializa-se o alcance da transmissão. O padrão LoRaWAN é CR = 1, porém, pode ser aumentado se o canal estiver com muito ruído (LORA ALLIANCE, 2015). Todas as configurações realizadas utilizam consideram CR = 1. Na Tabela 7, tem-se as configurações testadas em todos os pontos de análise definidos nas tabelas 3 e 4.

Nome Teste	DR	SF	BW	$T_c$
TESTE1	0	12	125kHz	$\frac{4}{5}$
TESTE2	1	11	125kHz	$\frac{4}{5}$
TESTE3	2	10	125kHz	$\frac{4}{5}$
TESTE4	3	9	125kHz	$\frac{4}{5}$
TESTE5	4	8	125kHz	$\frac{4}{5}$
TESTE6	5	7	125kHz	$\frac{4}{5}$
TESTE7	6	8	500kHz	$\frac{4}{5}$

**Tabela 7 – Configurações testadas**

O tempo no ar (ToA - *Time on Air*), conforme Turcinovic et al. (2020), é o tempo necessário para um sinal viajar do transmissor para o receptor. Para calcular esse tempo, utiliza-se inicialmente calcula-se o tempo de cada símbolo, que nada mais é do que o tempo necessário para enviar  $2^{SF}$  chips:

$$T_{simbolo} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (7)$$

Para calcular o tempo no ar, precisa-se calcular o tempo de transmissão do preâmbulo e o tempo de transmissão da carga útil:

$$T_{preambulo} = (n_{preambulo} + 4,25) \cdot T_{simbolo} \quad (8)$$

Em que  $n_{preambulo}$  é o número de preâmbulo, no Brasil  $n_{preambulo} = 8$ . Para calcular a transmissão de carga útil, tem-se:

$$n_{PL} = 8 + \lceil \text{ceil} \left( \frac{8 \cdot PL - 4 \cdot SF + 28 + 16 - 20 \cdot H}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right) \cdot (CR + 4), 0 \rceil \quad (9)$$

Onde:

- PL é o número de bytes do pacote;
- H = 0 se o cabeçalho está desabilitado e H = 1 se está presente;
- DE = 0 se a otimização de baixa taxa de dados está habilitada e DE = 1 se está habilitada;
- CR é o valor da taxa de codificação (1 à 4).

Então, torna-se possível calcular o ToA utilizando a equação:

$$ToA = (n_{preambolo} + 4,25 + n_{PL}) \cdot T_{simbolo} \quad (10)$$

A partir dessa equação consegue-se obter os valores teóricos para o ToA considerando 10 pacotes. Os valores podem ser observados na Tabela 8.

DR	ToA (s)
0	27,9
1	15,9
2	8,6
3	4,7
4	2,7
5	1,6
6	0,7

**Tabela 8 – ToA teórico**

Com o ToA calculado, obteve-se a vazão teórica considerando o ToA, observada na Tabela 9.

DR	Vazão (bits/s)
0	183
1	328
2	594
3	1085
4	1919
5	3221
6	7678

**Tabela 9 – Vazão teórica**

Os parâmetros de avaliação em cada ponto de teste são:

- **RSSI** (*Received Signal Strength Indication* - Intensidade do Sinal Recebido): é a medida estimada sobre a qualidade que o dispositivo pode ouvir, detectar e receber sinais, tornando possível saber se um sinal é forte o suficiente para estabelecer conexão sem fio (PREMACHANDRAN, 2010). A unidade de medida do RSSI é dBm (decibel milliwatt) e é um valor negativo, se o RSSI for de -30dBm, considera-se que o sinal é forte para realizar uma transmissão, porém, se o sinal for de -120 dBm, a transmissão não é garantida (SEMTECH CORPORATION, 2015a);
- **SNR**: medida de um sinal em meio ruidoso. A unidade de medida é em dB (decibel) e compara o nível de um sinal desejado com um nível de ruído de fundo, quanto mais alta for a SNR, menor o efeito do ruído sobre a medição do sinal (BARION, 2019). Segundo

Semtech Corporation (2015a) os valores de operação estão entre -20dB e +10dB, quanto mais próximo de +10dB, menos afetado está o sinal, e quanto mais próximo de -20dB mais interferências há no sinal;

- Vazão de pacotes: número de bits transmitidos na rede em um determinado tempo (SOUSA, 2020);
- Taxa de perda de pacotes: razão entre o número de pacotes recebidos e o número de pacotes enviados (SOUSA, 2020).

Após a identificação dos pontos de testes e da descrição de cada parâmetro analisado, no capítulo 5, têm-se os resultados dos experimentos realizados, tanto com o dispositivo TTGO quanto com o RD49C.

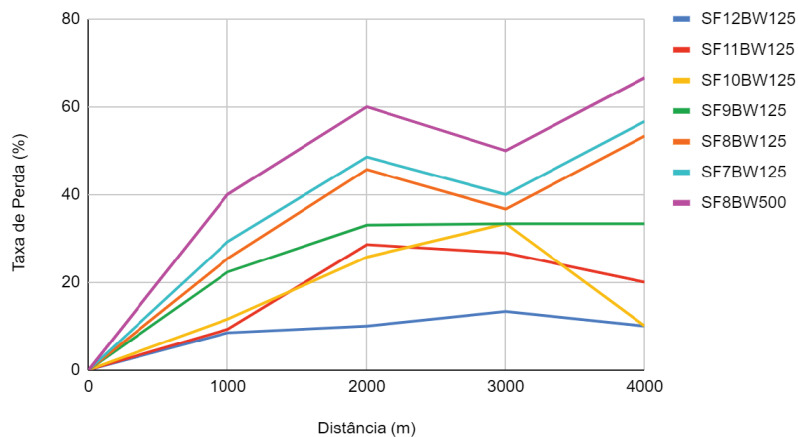
## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da análise da comunicação LoRa entre as unidades transmissoras e a unidade receptora. Os resultados obtidos contemplam a análise referente à taxa de perda de pacotes, vazão de pacotes, RSSI e SNR, em que as medições consistem na variação do SF para cada ponto de teste.

### 5.1 TAXA DE PERDA DE PACOTES

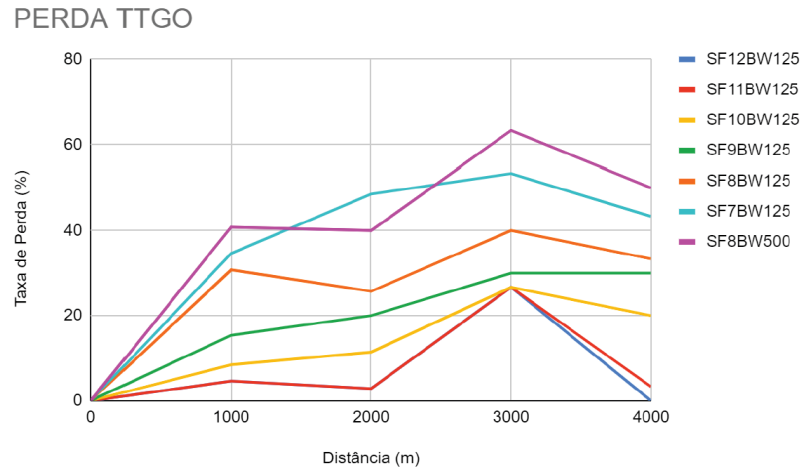
Avaliou-se a porcentagem média de pacotes perdidos a diferentes distâncias, para diversas configurações de DR (vide Tabela 7). Nos gráficos das figuras 22 e 23, verifica-se a perda de pacotes em relação a distância. Pode-se observar que conforme a distância entre dispositivo final e *gateway* aumenta, a taxa de perda de pacotes também aumenta, de maneira geral. Existem pontos em que a distância aumenta e a taxa de perda diminui, isso se deve ao fato de que a linha de visada é melhor, com menos obstáculos. Pode-se observar que em ambos os hardwares a maior perda foi com a configuração de DR = 6 e a menor perda foi com a configuração de DR = 0. O comportamento foi de acordo com o esperado: a perda em maiores distâncias é menor conforme aumenta-se o SF (ORTIZ, 2018). A perda desses pacotes se dá por diversos motivos, tendo em vista que a maioria dos pontos de teste são em área urbana com diferentes tipos de interferência.

**Figura 22 – Gráfico da taxa de perda de pacotes com o dispositivo RD49C**  
PERDA RD49C



Fonte: Autoria própria

**Figura 23 – Gráfico da taxa de perda de pacotes com o dispositivo TTGO**

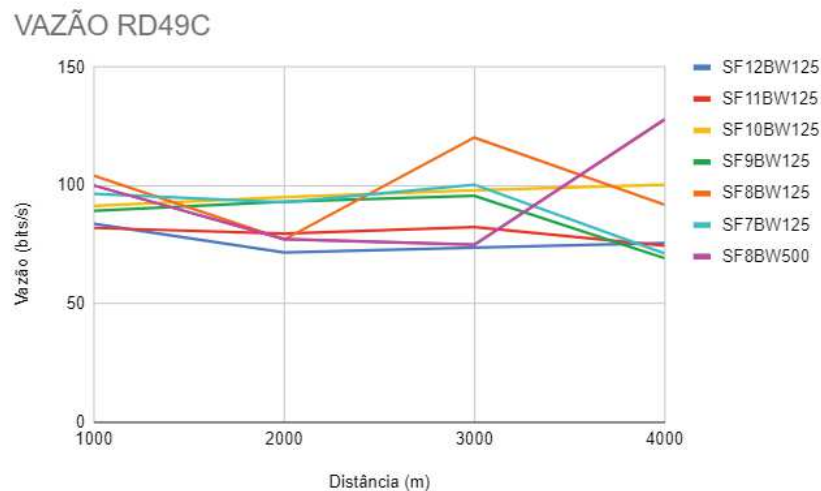


Fonte: Autoria própria

## 5.2 VAZÃO DE PACOTES

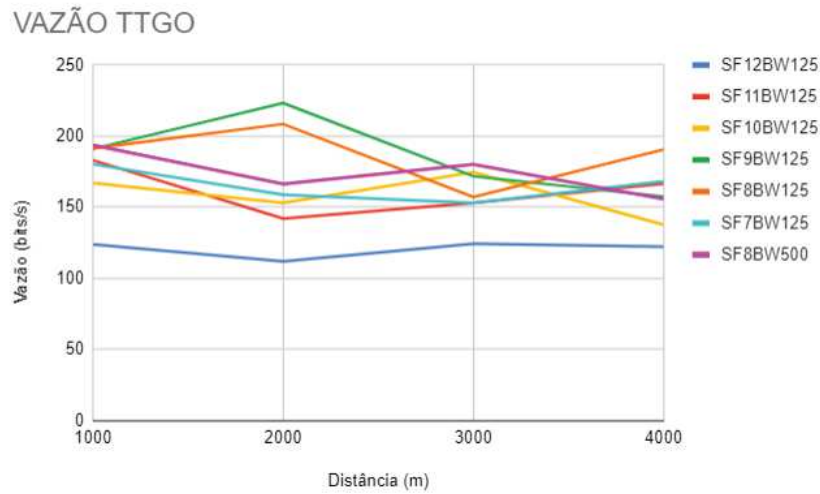
Avaliou-se a vazão dos pacotes baseando-se no tempo em que o primeiro e o último pacotes chegaram ao *gateway* para cada DR configurado. Nas Figuras 24 e 25 pode-se observar a vazão obtida para cada SF em função da distância. Observa-se que, a maior vazão obtida com o dispositivo RD49C foi com DR = 6, que permite que transmita uma quantidade maior de dados, que é o comportamento esperado, pois a vazão diminui conforme a distância aumenta (ORTIZ, 2018). Já para o dispositivo TTGO foi com DR = 3, essa diferença ocorre devido à perda de pacotes, delay entre pacotes e por interferências externas.

**Figura 24 – Gráfico da vazão de pacotes com o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria

**Figura 25 – Gráfico da vazão de pacotes com o dispositivo TTGO**

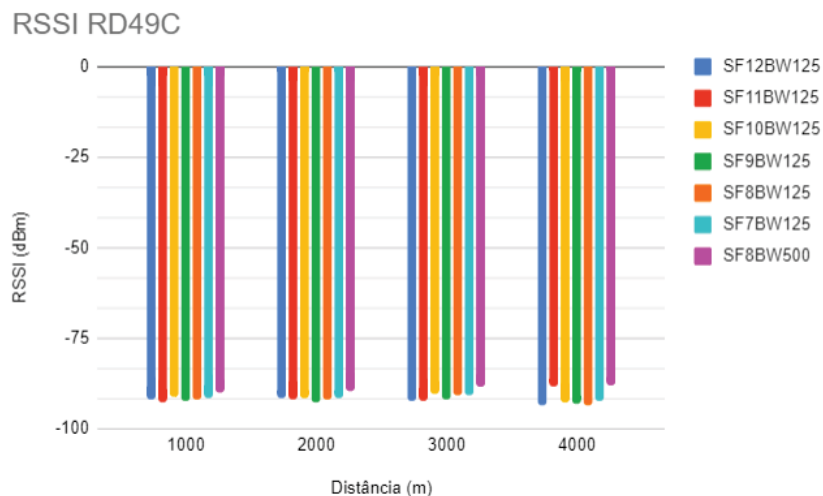


Fonte: Autoria própria

### 5.3 RSSI

Ao observar as figuras 26 e 27 percebe-se que o comportamento de RSSI de ambos os dispositivos é estável e que em todos pontos onde realizou-se o experimento é possível realizar a transmissão de dados, tendo em vista que nos dois dispositivos e em todos SF a medida de RSSI foi melhor que -120 dBm. Pode-se perceber que houve diferenças entre as médias de RSSI dos dispositivos. Isso pode ser consequência da diferença de hardware entre os dispositivos. Apesar de a antena e o chip transceptor serem iguais para os módulos, existem tolerâncias, diferenças de *layout* das placas e componentes, por exemplo.

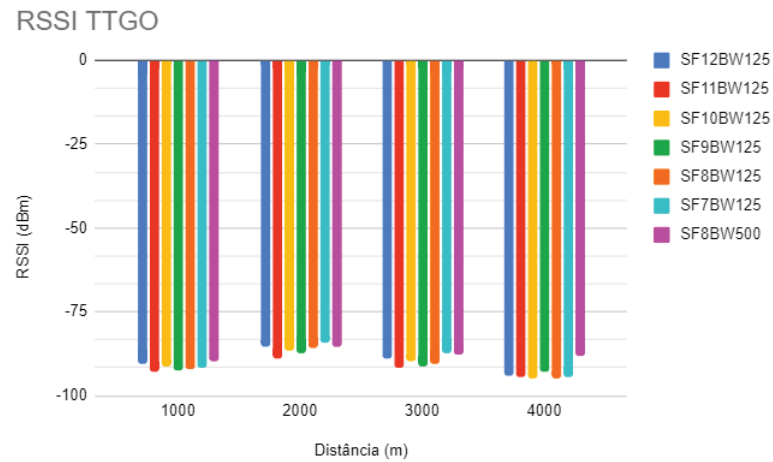
**Figura 26 – Gráfico da média de RSSI com o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria



**Figura 27 – Gráfico da média de RSSI com o dispositivo TTGO**

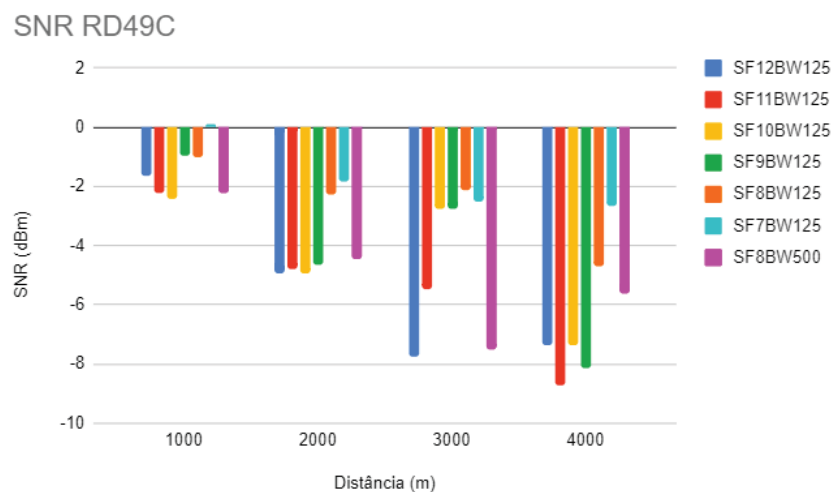


Fonte: Autoria própria

#### 5.4 SNR

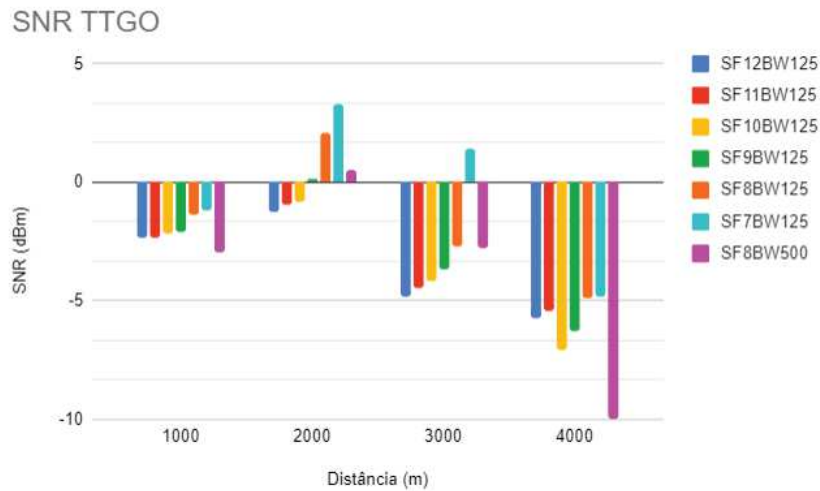
Os dados obtidos em relação ao SNR podem ser visualizados nas Figuras 28 e 29. Pode-se observar que, para ambos os dispositivos, o SF = 7 apresenta resultados inferiores a -5 dB, isso significa que a potência do sinal é maior que a potência do ruído. Porém, mesmo com valores de SNR negativos, o *gateway* recebe os pacotes. Em um contexto geral, percebe-se, que para o dispositivo RD49C, as interferências externas prejudicaram mais a medida de SNR do que no dispositivo TTGO. É possível observar também, que na maioria dos casos, a SNR diminui conforme aumenta-se a distância.

**Figura 28 – Gráfico da média da SNR com o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria

**Figura 29 – Gráfico da média da SNR com o dispositivo TTGO**

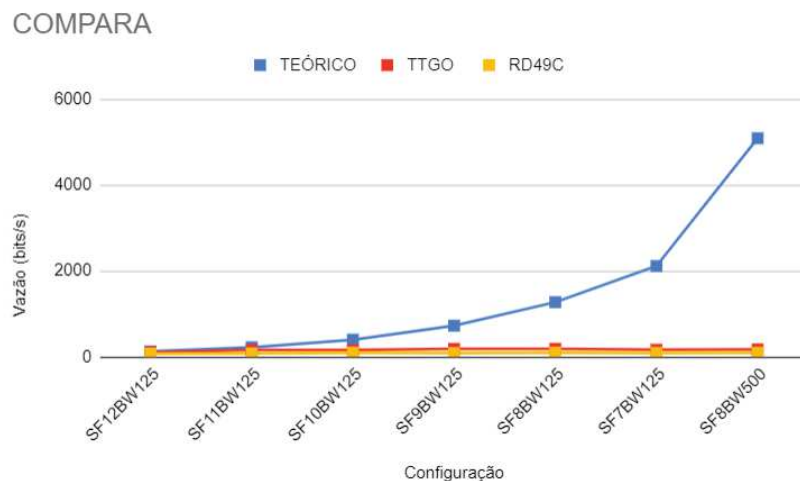


Fonte: Autoria própria

## 5.5 COMPARAÇÃO DA VAZÃO OBTIDA COM A VAZÃO TEÓRICA

A Figura 30 ilustra as curvas dos valor teórico e prático (média dos valores obtidos nas figuras 24 e 25) de vazão para cada SF. A diferença entre a vazão teórica com a obtida pode estar relacionada a diferentes fatores como: o hardware de cada dispositivo, a implementação de cada um, delays, perdas de pacotes e interferências externas.

**Figura 30 – Gráfico de comparação da vazão teórica com a vazão prática**

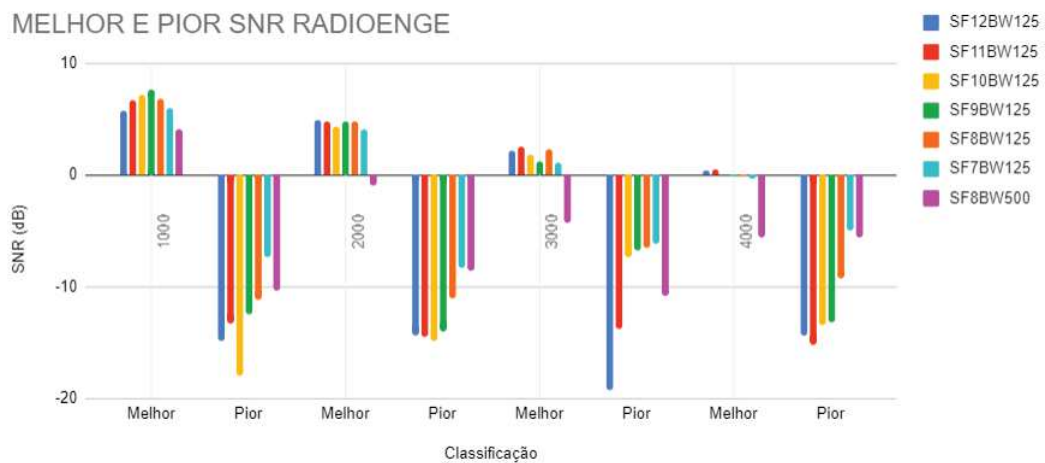


Fonte: Autoria própria

## 5.6 ANÁLISE DE MELHOR E PIOR SNR

Analisou-se o melhor e o pior SNR obtido em relação a cada distância, nas figuras 31 e 32 pode-se observar esses resultados. Em ambos os dispositivos, os valores para SNR ultrapassaram a medida de -10 dB. Porém, pode-se perceber que mesmo em pontos mais distantes, consegue-se obter valores acima de 0, como no caso dos melhores valores obtidos em 4000 metros. Observa-se também que, para o RD49C as melhores medidas de SNR foi com 1000 metros e as piores com 3000 metros. Para o TTGO as melhores medidas de SNR é na distância de 2000 metros e a pior medida de SNR foi com uma distância de 3000 metros. Essa análise mostra que, mesmo para grandes distâncias, é possível obter uma comunicação de qualidade.

**Figura 31 – Gráfico de medidas de melhor e pior SNR com o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria

**Figura 32 – Gráfico de medidas de melhor e pior SNR com o dispositivo TTGO**

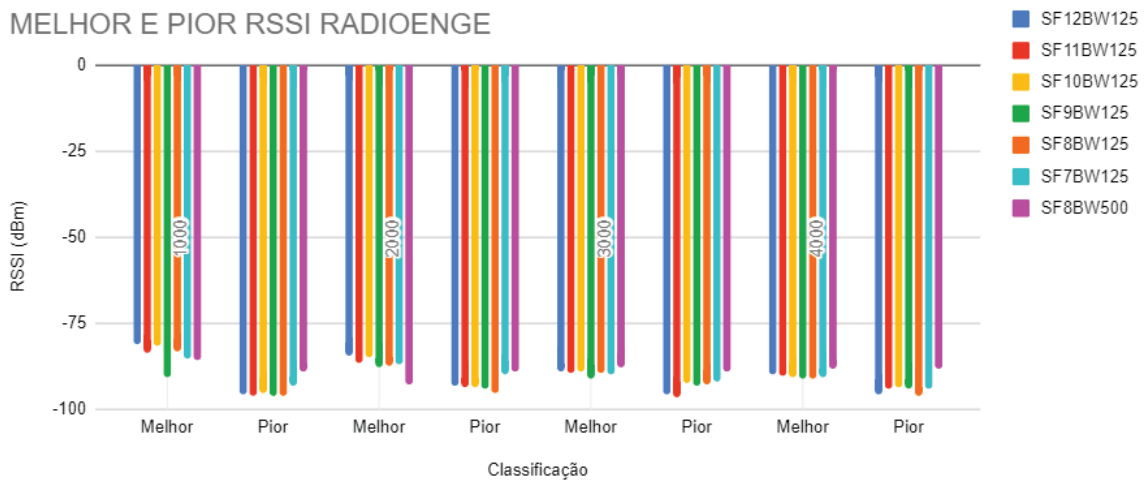


Fonte: Autoria própria

## 5.7 ANÁLISE DE MELHOR E PIOR RSSI

Para ambos os hardwares, analisou-se, o melhor e o pior RSSI obtido, nos pontos onde apresentou-se melhor e pior SNR, em relação a cada distância, as figuras 33 e 34 apresentam esses resultados. Em ambos os casos, obteve-se valores altos para SNR mesmo com o valor de RSSI próximo de -100 dBm. Percebe-se que a medida de RSSI é bastante constante para todos as distâncias em todos os SF. Então, pode-se perceber que, mesmo com um sinal abaixo do desejado (que seria de -40 dBm), ainda assim, consegue-se obter valores positivos para SNR e torna-se possível a comunicação entre os dispositivos.

**Figura 33 – Gráfico de medidas de melhor e pior RSSI com o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria

**Figura 34 – Gráfico de medidas de melhor e pior RSSI com o dispositivo TTGO**



Fonte: Autoria própria

## 5.8 COMPARAÇÃO DE MEDIDAS DE MELHOR E PIOR RSSI

Nas figuras 35 e 36, apresenta-se a comparação entre o melhor e pior RSSI obtido com o melhor e pior RSSI nos pontos em que obteve-se o melhor e pior SNR. O valor com a marcação SNR, refere-se aos valores de RSSI obtidos nos pontos em que a medida de SNR obtiveram o melhor e pior resultado, já os valores com a marcação REAL, diz respeito ao melhor e pior valor obtido para RSSI sem considerar a medida obtida para a SNR. Por exemplo, para SF11BW125, a melhor medida de SNR, resultou em um RSSI de -87,26 dBm, mas a melhor medida de RSSI obtida em campo é de -84,89 dBm para essa configuração.

**Figura 35 – Gráfico de comparação de melhor e pior RSSI com o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria

**Figura 36 – Gráfico de comparação de melhor e pior RSSI com o dispositivo TTGO**



Fonte: Autoria própria

Percebe-se que em ambos os casos, houve pouca diferença entre os valores, nas tabelas 10 e 11 pode-se observar os valores reais dessas diferenças. Isso sugere que, mesmo com valores melhores ou piores para RSSI consegue-se obter bons resultados em relação as medidas de SNR e perda de pacotes.

DR	MELHOR (SNR)	MELHOR (REAL)	PIOR (SNR)	PIOR (REAL)
0	-85,92	-85,92	-94,94	-95,99
1	-87,26	-84,89	-94,89	-96,09
2	-86,33	-86,33	-93,56	-94,49
3	-89,95	-88,88	-94,14	-95,28
4	-87,58	-87,58	-94,83	-95,22
5	-87,95	-87,95	-92,15	-93,99
6	-88,54	-87,13	-88,73	-91,03

**Tabela 10 – Comparativo de melhor e pior RSSI com o dispositivo RD49C**

DR	MELHOR (SNR)	MELHOR (REAL)	PIOR (SNR)	PIOR (REAL)
0	-82,15	-81,20	-95,98	-96,11
1	-86,28	-86,28	-96,18	-96,18
2	-82,88	-82,88	-96,23	-96,24
3	-85,89	-84,77	-95,50	-95,06
4	-85,27	-83,64	-96,65	-96,65
5	-83,62	-83,62	-94,19	-94,64
6	-86,35	-85,05	-89,23	-90,71

**Tabela 11 – Comparativo de melhor e pior RSSI com o dispositivo TTGO**

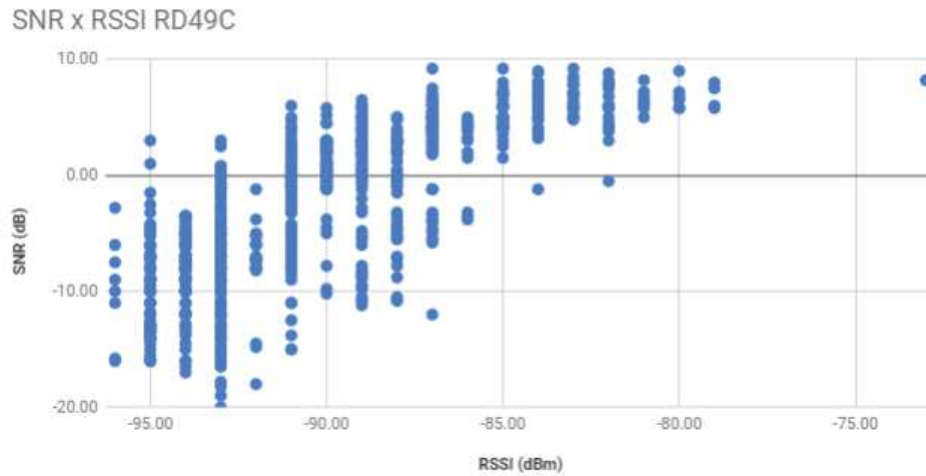
## 5.9 CORRELAÇÃO ENTRE O RSSI E SNR

A correlação entre RSSI e SNR para os dois dispositivos podem ser observadas nas figuras 37 e 38. Conforme Turcinovic et al. (2020) o RSSI é a potência do sinal recebido e SNR é a relação entre o sinal de potência recebido e o nível de relação sinal ruído, que é dado por:

$$SNR = \frac{S}{N+I} \quad (11)$$

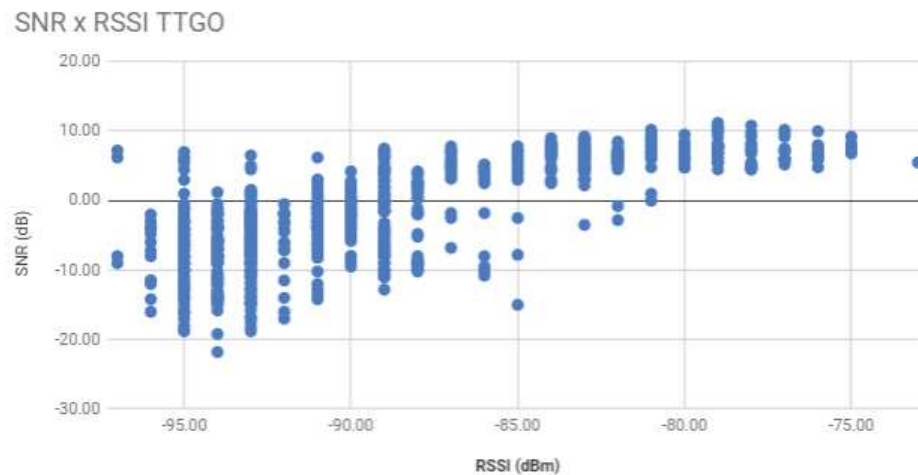
Em que S é a potência do sinal recebido, N o ruído e I a potência de interferência. Para os casos em que a banda é 125 kHz o ruído é considerado -123 dBm (TURCINOVIC et al., 2020). Para ambos os casos, percebe-se que conforme o RSSI se aproxima de -40 dBm o SNR fica acima de 0, indicando sinais menos ruidosos. O contrário também ocorre, conforme o RSSI se aproxima de -120 dBm mais negativo se torna a medida de SNR.

**Figura 37 – Gráfico de correlação entre RSSI e SNR para o dispositivo RD49C**



Fonte: Autoria própria

**Figura 38 – Gráfico de correlação entre RSSI e SNR para o dispositivo TTGO**

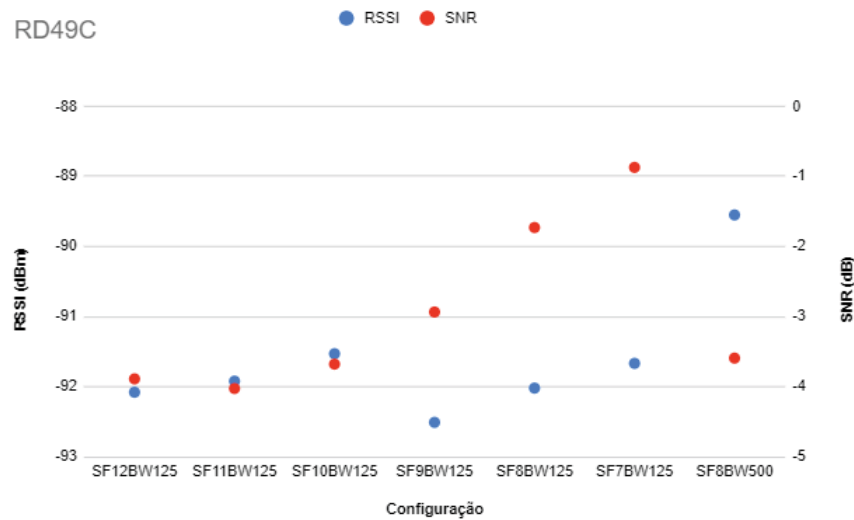


Fonte: Autoria própria

## 5.10 DEPENDÊNCIA DO RSSI E SNR PELO SF

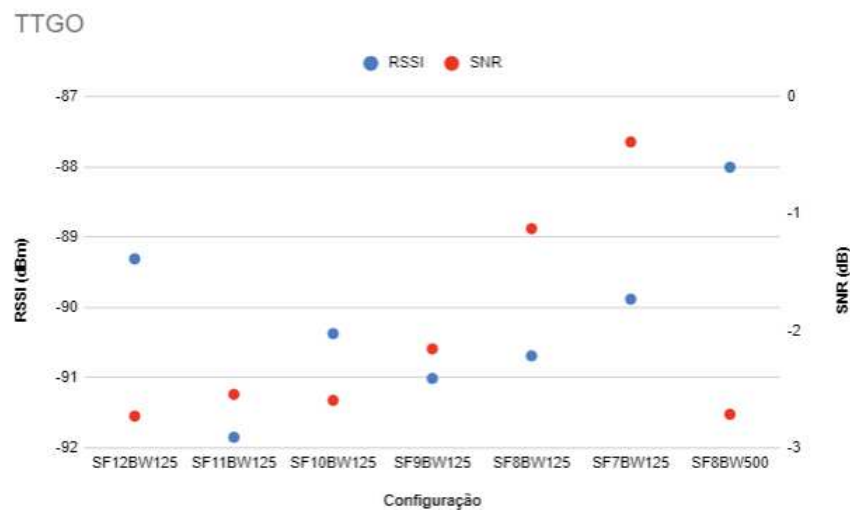
As figuras 39 e 40 mostram a média dos valores das medidas de RSSI e SNR em relação aos fatores de espalhamento. Pelas imagens, pode-se observar que para os dois dispositivos o aumento do RSSI nos SF é pequeno, mas ao comparar o SF = 12 com o SF = 7 percebe-se que há uma diferença de pelo menos 3 dBm, a mesma situação ocorre com o SNR. Para o caso em que a BW = 500 kHz também percebe-se esse aumento de RSSI, porém a SNR diminui.

Figura 39 – Gráfico de dependência entre RSSI e SNR pelo SF para o dispositivo RD49C



Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Gráfico de dependência entre RSSI e SNR pelo SF para o dispositivo TTGO



Fonte: Autoria própria

## 5.11 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados acima citados demonstram o desempenho da tecnologia LoRa no município de Pato Branco utilizando dois hardwares diferentes como dispositivos finais da classe B, com o intuito de comparar diferentes hardwares nas mesmas condições de testes. Observou-se que os dispositivos apresentaram desempenho semelhante quando expostos às mesmas condições e configurações. Em relação a diferença no tempo de execução dos testes, o TTGO leva em torno de 2 minutos para enviar 10 pacotes para cada SF, o RD49C demora em torno de 7 minutos para executar a mesma tarefa. Essa diferença se dá devido ao *firmware*



de cada um dos hardwares. Outro detalhe que se pode observar em relação ao hardware dos dispositivos é que, no TTGO as interferências causadas por fatores externos influenciam menos na transmissão dos pacotes. Além de observar a diferença entre os hardwares, observou-se o comportamento em diferentes valores de DR.

Ao alterar a configuração de DR para cada ponto, percebe-se a diferença de desempenho conforme a distância aumenta. Em relação a perda de pacotes, ela é inversamente proporcional ao tamanho do SF, por exemplo, para um SF = 12 tem-se menos perda de pacotes do que para um SF = 7. Ao observar o tempo de início e fim dos testes, houve pouca discrepância entre os pontos onde realizou-se os experimentos, mesmo em cenários onde o nível de interferência é superior. No caso da medida de RSSI, até mesmo no pior caso não atingiu -120 dBm, e ao associá-lo com a taxa de perda de pacotes, vê-se que, houve pouco impacto, pois a unidade receptora conseguiu estabelecer comunicação e receber pacotes. Já para as medidas de SNR percebe-se que o dispositivo da TTGO apresentou melhores resultados para SNR, se mostrando mais imune a ruídos, apresentando valores melhores quando comparado com os valores obtidos pelo RD49C. Mesmo com valores inferiores ao da TTGO, o RD49C também apresenta valores bons para SNR. Os dispositivos foram colocados a 10 cm de distância um do outro.

A diferença entre as medidas pode ocorrer por diferentes razões por serem realizadas em um ambiente urbano. As interferências causadas pelo meio são diferentes em cada ponto, no centro há mais prédios e construções, em outros além de prédios existem colinas e o ponto de medida fica em um local mais baixo, já outros apresentam áreas arborizadas. Conciliando diferentes fatores e distâncias, percebeu-se que para a maior distância, que é de 4000m, para ambos os dispositivos a configuração com menor perda é de DR = 0. Considerando a vazão, para ambos os dispositivos a maior vazão ocorre com DR = 6, devido a BW = 500 kHz, ao analisar os DR em que a BW é a mesma, percebe-se que a vazão diminui conforme aumenta-se a distância e também conforme maior SF maior é a vazão. O RSSI com melhor resultado foi com o DR = 6 nos dois dispositivos testados. Ao comparar a vazão teórica com a obtida percebe-se algumas discrepâncias, mas mesmo assim, não houve impedimento para que a comunicação fosse estabelecida.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho consiste na apresentação na tecnologia LoRa considerando a área urbana do município de Pato Branco. A tecnologia LoRa é utilizada para desenvolver soluções para IoT, e neste trabalho, tem o intuito de avaliar o desempenho dessa tecnologia considerando o alcance e a qualidade do sinal.

Diferentes plataformas podem ser utilizadas para o servidor de rede LoRaWAN, todavia a TTN se mostrou uma solução viável, pois disponibiliza uma solução em nuvem gratuita, que permite o gerenciamento dos dispositivos finais, *gateways* e servidores de aplicação por meio de um ambiente gráfico de fácil visualização. Além disso, se torna dispensável a infraestrutura física de um servidor, reduzindo custos de implantação e quaisquer outros problemas que podem vir a ocorrer devido a fatores externos.

Em relação ao servidor de aplicação, o TagoIO, também oferece uma solução em nuvem, com fácil integração com o servidor de rede da TTN. O servidor TagoIO apresenta diferentes recursos de visualização e armazenamento, de maneira personalizável, possibilitando realizar análise dos dados no próprio servidor. Também possui versão gratuita, em que as limitações dizem respeito ao tempo em que os dados recebidos ficam armazenados, que é de 30 dias, quantia de dados de entrada (7.000 por hora) e quantia de dados armazenados (800.000). Porém, optou-se por construir uma base de dados extern, devido a limitação de dados de entrada no TagoIO e também para ter uma cópia de segurança dos dados.

Para os dispositivos finais optou-se por dois hardwares diferentes, o TTGO e o RD49C. O TTGO inicia os testes a partir da comunicação da placa com o *gateway*, já o RD49C, os testes são iniciados inicialmente realizando a comunicação serial de um computador com o dispositivo final, posteriormente o RD49C tenta a comunicação com o *gateway* até obter comunicação para então iniciar o envio de pacotes. Quando os dispositivos enviam os pacotes direcionados ao *gateway*, obtém-se as medidas de RSSI, SNR, tempo de início de cada teste e demais informações. Com essas informações recebidas pelo *gateway* é possível extrair a taxa de perda de pacotes e a vazão, para as posteriores análises de comparação em relação a distância.

Depois que os testes em cada ponto são finalizados é possível realizar a análise das informações obtidas. As medidas obtidas para SNR e RSSI mostram que a tecnologia LoRa trabalha em torno de -90 dBm para RSSI e dentro da faixa de +10 dB à -20 dB para SNR considerando a média em cada distância. As medidas de SNR e RSSI também demonstram que, apesar da distância ser um fator que influencia muito nas medidas, os obstáculos (prédios, morros, carros, etc) tem grande influencia sobre esses fatores, tendo em vista que obteve-se as piores medidas de SNR e RSSI com distância = 1000 metros, por exemplo, sendo que, para as distâncias acima de 3000 metros, os resultados são considerados bons.

Com base nas medidas de todos os pontos de teste, mostrou-se também a correlação entre o RSSI e o SNR, em que, conforme o RSSI se aproxima de -40 dBm, o SNR também se aproxima de +10 dB, que são os valores em que a comunicação é melhor. Também mostrou-se a dependência do RSSI e SNR pelo SF, conforme diminui-se o SF melhora-se as medidas de RSSI e SNR.

Em relação a perda de pacotes, o comportamento esperado da tecnologia é de que conforme a distância aumente, a perda também aumente, e na maioria dos casos isso realmente ocorreu. Os casos em que a perda diminuiu foi devido a linha de visada ser melhor e conter menos obstáculos. Outro fator relevante em relação a perda, é que conforme aumenta-se o fator de espalhamento diminui-se a perda de pacotes, isso ocorre porque o pacote fica mais tempo no ar, que é o tempo estimado para que o pacote leva para viajar do transmissor até o receptor. A perda, o tempo no ar e o SF, implicam diretamente nos resultados da vazão de pacotes. Além de considerar a perda, o tempo no ar e o SF, deve-se considerar o delay. De qualquer forma, os resultados para a vazão foram de acordo com o esperado, tendo em vista todos os fatores já comentados.

Assim, concluí-se que, para a área urbana patobranquense, a tecnologia LoRaWAN apresenta resultados satisfatórios, pois apresenta bons resultados para RSSI e SNR, a perda de pacotes é baixa levando em conta que a antena, tanto dos transmissores quanto do receptor, tem ganho de 3 dBi, levando em conta que o receptor não estava no melhor ponto possível, devido a limitações de acesso. É possível que as mais diversas aplicações utilizando a tecnologia LoRa sejam implantadas no município. Outras antenas podem ser utilizadas a fim de melhorar a transmissão e recepção pelos dispositivos. Considerando todas as análises, o SF = 12, possui o melhor desempenho na cidade de Pato Branco.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

O intuito deste trabalho é introduzir a tecnologia LoRa no município para que novas pesquisas e projetos sejam iniciados, com o objetivo de desenvolver ainda mais o município. Projetos como monitoramento de fluxo de veículos, transporte público, caminhões da coleta de lixo, estacionamento rotativo, monitorar em tempo real parâmetros de equipamentos médicos hospitalares ou ambientes críticos, dentre outros, podem ser implementados utilizando a tecnologia, que podem contribuir para a melhoria da qualidade de vida dos munícipes.

## REFERÊNCIAS

- ABINC. **Anatel muda lei para aprovação de redes LoRaWan**. 2017. Acesso em: 24 ago. 2019. Disponível em: <<https://abinc.org.br/anatel-muda-lei-para-aprovacao-de-redes-lorawan/>>.
- ABINC. **Associação Brasileira de IoT se junta à LoRa Alliance**. 2018. Acesso em: 24 ago. 2019. Disponível em: <<https://abinc.org.br/associacao-brasileira-de-iot-se-junta-a-lora-alliance/>>.
- ABINC. **ABINC e CABASE assinam acordo de cooperação para integrar o sistema de IoT entre Brasil e Argentina**. 2019. Acesso em: 2 jul. 2019. Disponível em: <<https://abinc.org.br/abinc-e-cabase-assinam-acordo-de-cooperacao-para-integrar-o-sistema-de-iot-entre-brasil-e-argentina/>>.
- AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, Fourthquarter 2015.
- ANATEL. **Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017**. 2018. Acesso em: 30 ago. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3s5vbgc>>.
- ANDREEV, S. et al. Understanding the iot connectivity landscape: a contemporary m2m radio technology roadmap. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 09, p. 32–40, 2015.
- ASHTON, K. **That ‘Internet of Things’ Thing**. 2009. Acesso em: 7 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>>.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range low power networks for the internet of things. **MDPI Open Access Journals**, 9 september 2016, v. 16, p. 1–13, 2016.
- BARION, R. **SNR – O que é? Como funciona?** 2019. Acesso em: 20 mar. 2021. Disponível em: <<http://www.entelco.com.br/blog/snr-o-que-e-como-funciona/>>.
- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, 2016.
- DIENG, O. et al. A study on iot solutions for preventing cattle rustling in african context. **In Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing (ICC ’17)**, United Kingdom Cambridge, p. 11, 2017.
- DUCROT, N.; RAY, D.; SAADANI, A. **LoRa Device Developer Guide: Orange connected objects partnerships**. 2016. Acesso em: 22 ago. 2019. Disponível em: <<https://developer.orange.com/wp-content/uploads/LoRa-Device-Developer-Guide-Orange.pdf>>.

GUBBI, J. et al. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. **Future generation computer systems**, Elsevier, v. 29, n. 07, p. 1645–1660, 2013.

HONÓRIO, F. G. **Efeito do desvanecimento Nakagami-M na escalabilidade das redes LoRa/LoRaWAN**. Dissertação (Mestrado) — UTFPR, 2018.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks–Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). **IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)**, p. 1–314, Sep. 2011.

IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. **IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011)**, p. 1–709, April 2016.

JIANG, L. e. a. Proceedings of 2004 international conference on machine learning and cybernetics (ieee cat. no.04ex826) - smart home research. v. 2, p. 659–663 vol.2, Aug 2004.

JUNIOR, V. P. da S. **Conheça a tecnologia LoRa® e o protocolo LoRaWAN™**. 2017. Acesso em: 3 set. 2019. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/>>.

KORTUEM et al. Smart objects as building blocks for the internet of things. **IEEE Internet Computing**, v. 14, n. 01, p. 44–51, 2010.

LORA ALLIANCE. What is it? a technical overview of lora® and lorawan™. LORA ALLIANCE, 2015.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN 1.1 Specification**. 2017. Acesso em: 28 ago. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3xCdgP4>>.

LORA ALLIANCE. **LoRa Alliance Passes 100 LoRaWAN™ Network Operator Milestone with Coverage in 100 Countries**. 2018. Acesso em: 14 nov. 2019. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/in-the-news/lora-alliance-passes-100-lorawan-network-operator-milestone-coverage-100-countries>>.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN® Specification v1.0.3**. 2018. Acesso em: 10 mar. 2021. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan1.0.3.pdf>>.

NUNES, B. **Introdução a LoRa®, NB-IoT e Sigfox**. 2017. Acesso em: 24 ago. 2019. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/lora-nb-iot-e-sigfox/>>.

ORTIZ, F. M. **Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a Internet das Coisas**. Dissertação (Mestrado) — UFRJ, 2018.

PETÄJÄJÄRVI, J. et al. Evaluation of lora lpwan technology for indoor remote health and wellbeing monitoring. **2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)**, IEEE, p. 1–5, 2017.

PREMACHANDRAN, R. **SNR, RSSI, EIRP and Free Space Path Loss**. 2010. Acesso em: 20 mar. 2021. Disponível em: <<https://community.cisco.com/t5/wireless-mobility-documents/snr-rssi-eirp-and-free-space-path-loss/ta-p/3128478>>.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855–873, Secondquarter 2017.

ROSSATO, J.; SPANHOL, F.; CAMARGO, E. Implantação e avaliação de uma rede sem-fio de longo alcance e baixa potência para cidades inteligentes. In: . [S.l.: s.n.], 2020.

SANTOS, B. P. et al. Internet das coisas: da teoria a prática. **Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, 2016.

SANTOS, L. H. S.; MOTA, L. T. M. Utilização de tecnologia sem fio de longo alcance para smart grids. In: . [S.l.: s.n.], 2020.

SEMTECH CORPORATION. **LoRa™ Modulation Basics**. 2015. Acesso em: 28 out. 2019. Disponível em: <<http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>>.

SEMTECH CORPORATION. **What is LoRa?** 2015. Acesso em: 12 out. 2019. Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>>.

SOARES, A. J. P. et al. **Avaliação da tecnologia LoRa como solução de IoT para coberturas de comunicação em redes elétricas inteligentes**. Dissertação (Mestrado) — UFU, 2018.

SOUSA, L. S. d. **Redes de computadores e a Internet**. 2020. Acesso em: 26 mar. 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/3xF7e0o>>.

TEIXEIRA, G.; ALMEIDA, J. V. P. **Rede LoRa® e protocolo LoRaWAN® aplicados na agricultura de precisão no Brasil**. 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Eletrônica), UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), Ponta Grossa.

TURCINOVIC, F. et al. Analysis of lora parameters in real-world communication. In: . [S.l.: s.n.], 2020.

WI-FI ALLIANCE. **Wi-Fi CERTIFIED 6™ delivers new Wi-Fi® era**. 2019. Acesso em: 06 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-certified-6-delivers-new-wi-fi-era>>.

ZANELLA, A. et al. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 1, p. 22–32, Feb 2014.

**APÊNDICE A - CÓDIGO PHP**

```
1 <?php
2
3     include("dbconn.php");
4
5     $jsondata = json_decode(file_get_contents('php://input'), true);
6
7     $PAYLOAD      = $jsondata['payload_raw'];
8     $CONTADOR     = $jsondata['counter'];
9     $HARDWARE     = $jsondata['hardware_serial'];
10    $metadata      = $jsondata['metadata'];
11    $FREQUENCIA    = $metadata['frequency'];
12    $DATARATE      = $metadata['data_rate'];
13    $DATAHORA      = $metadata['time'];
14
15    $gateways      = $metadata['gateways'];
16    $gateway       = $gateways[0];
17    $RSSI          = $gateway['rssi'];
18    $SNR           = $gateway['snr'];
19    $TIMESTAMP     = $gateway['timestamp'];
20
21    $r = mysqli_query($dbh, "INSERT INTO maira (datarate, rssi, snr,
22    datahora, timestamp, frecuencia, payload, contador, hw) VALUES
23    ('".$DATARATE."', '".$RSSI."', '".$SNR."', '".$DATAHORA."',
24    '".$TIMESTAMP."', '".$FREQUENCIA."', '".$PAYLOAD."', '".$CONTADOR."',
25    '".$HARDWARE."')");
26
27    mysqli_close($dbh);
28 ?>
```