

Análise de desempenho do protocolo LoRa/LoRaWAN para utilização em soluções de agricultura de precisão

Rubens Rezende Oliveira¹, Robson Costa¹

¹Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)
Câmpus Lages – 88506-400 – Lages – SC – Brasil

rurezende@gmail.com, robson.costa@ifsc.edu.br

Abstract. *Due to the large number of parameters that can be configured on LoRa/LoRaWAN devices, defining an ideal setting can become a challenge. This work aimed to study the usability and behavior of different configurations of LoRa technology and the LoRaWAN communication protocol through experimental tests. The results obtained showed that the use of different data rates (DR), and consequently different values of bandwidth (BW) and spreading factor (SF) in conjunction with different distances between end-node and gateway may result in slightly different proper settings. Data analysis was performed considering the rate of successfully delivered messages, the noise level in the messages (SNR) and the signal strength of the received messages (RSSI).*

Resumo. *Devido ao grande número de parâmetros passíveis de serem configurados em dispositivos LoRa/LoRaWAN, a definição de um conjunto ideal pode tornar-se um desafio. Este trabalho teve por objetivo estudar a usabilidade e o comportamento de diferentes configurações da tecnologia LoRa e do protocolo de comunicação LoRaWAN através de testes experimentais. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de diferentes taxas de transmissão (Data Rate - DR), e conseqüente diferentes valores de largura de banda (Bandwidth - BW) e fator de espalhamento (Spread Factor - SF) em conjunto com diferentes distâncias entre o end-node e o gateway podem resultar em configurações adequadas ligeiramente distintas. A análise dos dados foi realizada considerando a taxa de mensagens entregue com sucesso, o nível de ruído existente nas mensagens (SNR) e a potência do sinal das mensagens recebidas (RSSI).*

1. Introdução

Com o crescente desenvolvimento das tecnologias computacionais e a redução da disponibilidade de tempo na sociedade moderna, a necessidade e o anseio pela automatização de tarefas têm se tornado cada vez mais presentes. Neste contexto, a utilização do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) possibilita não apenas intermediar, mas também aprimorar tarefas antes realizadas por seres humanos (Cerná, Marie e Vallisová, Lucie 2021). Seus benefícios são corroborados, na indústria, com sensores em equipamentos de precisão, na saúde, com marcapassos cardíacos inteligentes facilitando o acompanhamento de pacientes, ou até mesmo no lazer, com eletrodomésticos conhecendo as preferências do usuário (Dlamini e Johnston 2016).

No âmbito do agronegócio, a gama de uso de soluções baseadas em IoT é igualmente vasta, como por exemplo, o monitoramento de rebanhos, a utilização de estações

agrometeorológicas para o monitoramento de microclimas e o uso de sistemas de irrigação automatizados (Bandara et al. 2020). Todavia, a aplicação de soluções de IoT em ambientes rurais, especialmente no Brasil, pode ser uma tarefa complexa. De forma geral, soluções baseadas em IoT para o agronegócio comumente impedem a utilização de sistemas cabeados, seja para o fornecimento de energia elétrica, seja para o acesso ao sistema de comunicação. Sendo assim, grande parte destas soluções necessitam utilizar um sistema de alimentação baseado em baterias e um sistema de comunicação sem fio (*wireless*). Como consequência, o consumo de energia elétrica e as características dos diferentes sistemas de comunicação sem fio são fatores cruciais para o sucesso de uma solução. No Brasil, a situação é agravada pela falta de acesso à Internet existente em grande parte das áreas rurais (LLC 2015).

Todavia, uma alternativa capaz de se adequar à estas limitações é a utilização de soluções que implementam uma *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), permitindo desta forma a comunicação em uma ampla área de cobertura sem o uso de fios e com um baixo consumo de energia. Existem diversos protocolos de comunicação para LPWANs, podemos citar por exemplo *Sigfox*, *Narrow Band IoT* (NB-IoT) e 5G, que proporcionam economia de energia e uma grande área de cobertura, cada um com suas respectivas características e usabilidades (Saifullah et al. 2018). Protocolos diferentes possuem adequações diferentes de *firmware*¹, portanto equipamentos físicos e recursos de programação não são na maioria das vezes intercambiáveis. Visto isso é necessário possuir uma certeza dos requisitos do problema e da tecnologia a ser implementada.

Um protocolo LPWAN, que tem ganhado muito destaque em âmbito acadêmico e industrial, é o LoRa/LoRaWAN (Rahman e Suryanegara 2017). O mesmo possui diversas características compatíveis ao uso em soluções para o agronegócio, pois além de cobrir uma área relativamente grande e ter um consumo de energia estável, também proporciona uma certa autonomia ao sistema devido a não ser dependente de empresas e redes de telefonia (Zourmand et al. 2019). Apesar de possuir uma capacidade de transmissão moderada para a atualidade, ela é ideal para a transmissão de dados de sensores, e funciona muito bem para processos que não dependem tanto do recebimento externo de dados, o que se encaixa perfeitamente na maior parte dos processos de monitoramento. Também é possível realizar o manejo e configuração dos equipamentos de forma particular, o que gera uma menor dependência de provedores e operadoras de telefonia aumentando assim significativamente a autonomia do sistema do ponto de vista de infraestrutura de comunicação. Logo, para um local isolado, onde não existem antenas de telefonia móvel ou outro meio de comunicação, é plausível e viável a instalação de antenas e aparelhagem LoRaWAN de forma particular.

A correta configuração do equipamento LoRa é fundamental para o melhor aproveitamento de todas as suas características. Todavia, alcançar esta meta pode ser um trabalho complexo, visto que dependendo do volume de dados, da área a ser trabalhada ou do objetivo a ser alcançado a configuração pode ser drasticamente alterada. Por exemplo, caso seja necessário priorizar velocidade de transmissão, é possível aumentar a taxa de transmissão (*data rate*) do sistema, entretanto isto acarretará em uma menor área de cobertura do mesmo, sendo o inverso verdadeiro. Além disso, para dispositivos móveis, o protocolo LoRaWAN ainda permite que a taxa de transmissão seja definida de forma

¹*Firmware* é uma classe de *software* que fornece controle de baixo nível para o *hardware*.

dinâmica (ADR – *Adaptive Data Rate*), baseada na intensidade do sinal recebido e nos níveis de ruído experienciados em transmissões anteriores (SNR - *Signal to Noise Ratio*).

São diversos os pormenores relevantes para a obtenção da configuração ideal da aparelhagem LoRa/LoRaWAN. Desta forma, para uma empresa, muitas vezes pode ser despendido um investimento muito grande de tempo e dinheiro com testes e medições, para talvez chegar a um resultado insatisfatório e descobrir que a tecnologia LoRaWAN não era a ideal para solucionar o problema. Com o objetivo de auxiliar nesta empreitada, este trabalho propõe o desenvolvimento de um *software* que permita a realização de diversos conjuntos de testes de uma infraestrutura LoRa/LoRaWAN, de forma a facilitar o entendimento e definição das configurações mais adequadas ao ambiente em questão. De forma a alcançar este objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- realizar o estudo da tecnologia LoRa (camada física);
- realizar o estudo do padrão LoRaWAN (camada de enlace e rede);
- desenvolver um *software* que permita a realização de testes de uma interface LoRa/LoRaWAN baseados em diferentes conjuntos de parâmetros;
- realizar um conjunto de testes em diferentes ambientes para analisar e comparar os resultados obtidos;

A metodologia utilizada neste trabalho lançará mão de um estudo transversal, exploratório/descritivo com uma abordagem quantitativa, dividido em 3 (três) etapas (Fortin et al. 2009). Na primeira etapa será realizado um estudo técnico do protocolo LoRa e do padrão LoRaWAN para se obter a compreensão de todos os detalhes técnicos e parâmetros passíveis de serem ajustados. A segunda etapa consiste no desenvolvimento de um *software* que permita a realização de testes baseados em diferentes conjuntos parâmetros. Por fim, a terceira e última etapa consiste na definição e realização de um conjunto de testes a serem realizados em diferentes ambientes para a análise, comparação e compreensão dos resultados obtidos.

Este documento está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentado o referencial teórico utilizado como base para o desenvolvimento deste trabalho; na seção 3 é descrita e detalhada a solução proposta; na seção 4 são apresentados os testes realizados bem como são discutidos os seus respectivos resultados; por fim, na seção 5, é retratada a conclusão obtida assim como direcionamentos para trabalhos futuros.

2. Referencial Teórico

Nesta seção são apresentadas informações pertinentes relacionadas ao desenvolvimento de soluções IoT, bem como são descritos e detalhados diferentes protocolos de comunicação com um foco direcionado para soluções LPWAN.

2.1. Industria 4.0

Grande parte do sucesso e desenvolvimento da espécie humana deve-se ao desenvolvimento e uso apropriado de tecnologias. Quando nos referimos ao conceito de "tecnologia", é necessário ter uma visão um pouco mais ampla, afinal, uma pedra afiada amarrada em uma estaca de madeira já representou o ápice da tecnologia humana. Por mais banal e simples que esta tecnologia primitiva aparente ser, ela era crucial para a caça e a auto-defesa de um indivíduo, definindo e interferindo fortemente em suas chances de sobrevivência.

Ao passar das eras, estas “tecnologias” foram se tornando cada vez mais sofisticadas e intrínsecas à sociedade, mostrando-se tão relevantes ao ponto de definir períodos históricos, como por exemplo as diferentes revoluções industriais (Sakurai e Zuchi 2018).

A Primeira Revolução Industrial data do final do século XVIII e início do século XIX. Dos muitos adventos trazidos com ela, pode-se citar como os principais, o uso das máquinas à vapor na indústria têxtil e locomotiva. Com isso, a produção de vestimentas e acessórios deixou de ser artesanal e de produção lenta para torna-se manufaturada e significativamente mais ágil. Além disso, o uso de combustíveis para aquecer caldeiras e gerar vapor, foi uma novidade bem vinda para a navegação e para as linhas férreas de trens, tornando a locomoção entre cidades e países muito mais rápida e eficiente.

A Segunda Revolução Industrial data do final do século XIX e se caracteriza principalmente pelo advento da eletricidade e do motor à combustão. Com cidades e casas agora iluminadas e diversos ramos de indústrias nascendo, com um pequeno foco na automobilística, o real proveito e conforto da tecnologia consegue ser um pouco mais visíveis aos nossos olhos de cidadãos modernos do século XXI. Um dos adventos marcantes desta época foi o telegrafo, demarcando um marco nos primeiros passos das comunicações a longa distância.

A Terceira Revolução Industrial se passa no final do século XX e teve como principal fator o uso de equipamentos eletrônicos. Como alguns de seus principais adventos pode-se citar os primeiros passos da computação e das telecomunicações, duas tecnologias que representam o prelúdio do tema abordado neste trabalho.

O desenvolvimento de fato não parece ter um fim próximo, o anseio por comodidades e melhores ferramentas de trabalho leva cada vez mais cientistas a desenvolverem novas tecnologias. Uma das mais recentes e real foco deste trabalho é a Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), que vem amplamente sendo aceita e utilizada por diversas áreas da sociedade moderna. Esta, por sua vez, tem ganhado tamanha importância que pode ser considerada o pilar da mais recente revolução industrial vivida no século XXI, também chamada de Indústria 4.0 ou a Quarta Revolução Industrial (Figura 1).

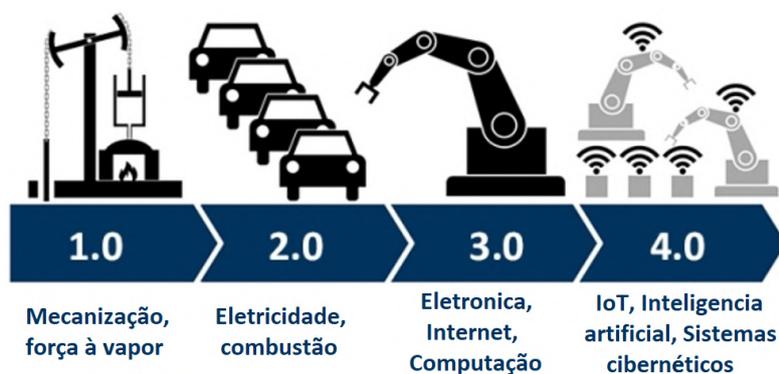


Figura 1. Evolução das revoluções industriais (Gislan 2021).

Um dos conceitos base da Indústria 4.0 é que os processos devem passar a ser autônomos e mais escaláveis. Diferentemente das outras revoluções, que possuíam uma descoberta revolucionária, a Quarta Revolução Industrial caminha mais para um rumo de

conectar aparelhos à Internet, possibilitando tornar processos mais inteligentes e interativos. Com isso nascem os conceitos de Cidades Inteligentes (*Smart Cities*), Fazendas Inteligentes (*Smart Farming*), Casas Inteligentes (*Smart Houses*) dentre outros. Uma vez conectado, de forma remota é possível gerir e acompanhar equipamentos e processos que não são necessariamente requeridos de acompanhamento humano constante, através do uso de técnicas de Inteligência Artificial, outro advento da Indústria 4.0 (Figura 2).

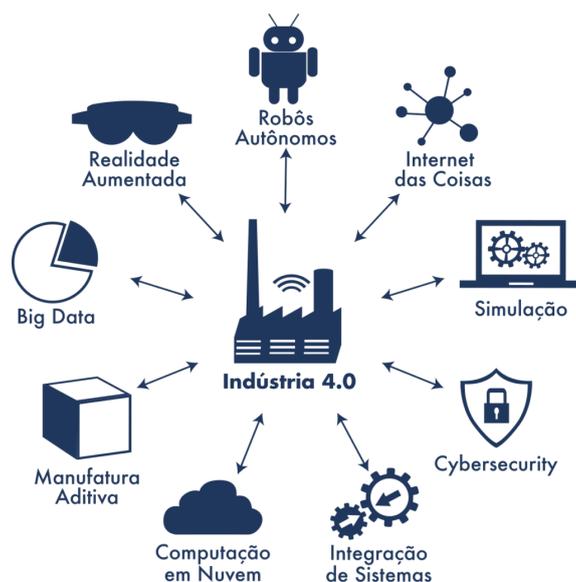


Figura 2. Pilares da Indústria 4.0 (Silva 2022).

Aparelhos conectados em rede possuem uma grande versatilidade e depõem de características que permitem o aprimoramento e automatização de diversas tarefas. Pode-se citar exemplos simples, referentes ao dia a dia, como uma cafeteira que prepara o café de forma automática. Assim que o usuário a configura a partir de seu *smartphone*, suas preferências e horários de ativação são configuradas. A mesma ainda pode trabalhar em conjunto com outros eletrodomésticos ajustados e definidos a fim de gerar uma residência mais proativa e prática, emitindo por exemplo, um alerta que o café está acabando, fazendo uma requisição ao usuário para comprar mais ou ainda emitindo diretamente um pedido ao mercado de forma completamente autônoma.

O conceito geral de IoT é relativamente amplo, pois como o próprio nome nos refere, *Internet of Things* ou Internet das Coisas, parte-se do pressuposto que existe um objeto com acesso à Internet (Chaudhary et al. 2019; Atzori et al. 2010). Visto isto, não estamos necessariamente reféns de tecnologias sem fio, sendo plausível e viável a concepção de soluções IoT baseada em sistema de comunicação cabeados. Todavia, como um dos próprios conceitos da Indústria 4.0 é a praticidade, o uso de cabos na maioria das vezes se mostra menos conveniente e por conta disto, grande parte das soluções tenta desfrutar de abordagens baseadas em sistema de comunicação sem fio (*wireless*).

De forma similar, o desenvolvimento de soluções IoT não se restringem ao uso de microcontroladores (MCUs - *Microcontroller Units*), como por exemplo Arduinos, ESPs ou Raspberry. Apresenta-se plausível a utilização de sistemas convencionais com processadores mais robustos. No entanto, a maior parte das soluções IoT não requer grande

capacidade de processamento, já que os microcontroladores cumprem as exigências necessárias, além de serem mais baratos e consumirem menos energia. A problemática e a necessidade é que irão definir o grau e o tipo de recursos a serem utilizados.

Os uso de soluções IoT têm se mostrado muito eficiente em comparação a alguns métodos tradicionais e, por conta disto, tem ganhado cada vez mais espaço na sociedade. Em diversos setores, seu uso já é praticamente um pré-requisito. Na área da saúde, por exemplo, o uso de marcapassos inteligentes tem tornado o acompanhamento de pacientes com problemas cardíacos muito mais seguro, uma vez que o paciente possui um registro fiel do estado de seus batimentos cardíacos. Isto permite à equipe médica realizar uma análise do estado do paciente de forma mais simples e menos invasiva, pois o procedimento pode ser feito sem o paciente sair de sua casa ou rotina (Abed e Abd-aljabar 2020).

2.2. Soluções de IoT para o Agronegócio

Soluções IoT como um todo promovem controle e precisão na sua área de aplicação. Como o seu funcionamento independe de um ser humano com tempo dedicado, é possível manter atividades sob monitoramento em tempo praticamente integral. Isto se apresenta benéfico em diversos cenários, sendo um deles o escopo deste trabalho, o agronegócio (Farooq et al. 2019).

Em uma grande plantação, por exemplo, torna-se inviável o agricultor realizar a verificação local diariamente. No entanto, esta tarefa é crucial para realizar a identificação dos manejos necessários (ex.: irrigação e aplicação de defensivos agrícolas) de forma a evitar uma perda potencial na produção. Com o auxílio de sensores IoT, uma estação agrometeorológica pode, por exemplo, realizar a coleta de índices agrometeorológicos (ex.: temperatura e umidade da terra e do ar, radiação ultravioleta, molhamento foliar, etc) e disponibilizá-los ao produtor para que este possa tomar as suas decisões.

Outro exemplo da força que soluções IoT têm na agricultura é com o cuidado e a automação de atividades essenciais para o desenvolvimento das plantas. Irrigadores automáticos são extremamente versáteis, pois podem ser configurados para sempre irrigarem as plantas em determinado horário, ou ainda fazer uma checagem da umidade do solo e do nível de radiação solar para realizar a irrigação. Em ambientes controlados como estufas, o cultivo de flores sensíveis pode ser estimulado, todos os fatores de solo e de luminosidade podem ser facilmente mensurados e ajustados para um crescimento mais eficiente (Choi et al. 2020).

Com o auxílio de sistemas de posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS) ou outras ferramentas de geolocalização, a produção de gado e outras práticas de pecuária podem ser realizadas com mais segurança. A localização dos animais pode ser coletada e exibida em uma tela de *smartphone*, evitando assim que os pecuaristas sofram com animais perdidos ou furtados (Koompaiojn et al. 2017).

Fazendas de porcos, por exemplo, possuem comumente o problema de desnutrição de alguns indivíduos. Os animais ficam em grupos alocados em currais e em diversas ocasiões alguns se alimentam melhor que outros fazendo com que ocorra uma discrepância entre o tamanho dos mesmos. Isto resulta em animais subdesenvolvidos e, no conseqüente, prejuízo ao criador. Análises de imagens obtidas de cima do curral podem verificar quais animais encontram-se nestas categorias e emitir um alerta ao criador para que o mesmo tome providências em relação ao animal (Lee et al. 2019).

Estes são apenas alguns exemplos das melhorias e praticidades que o uso de tecnologias baseadas em IoT podem trazer ao agronegócio. Em ambientes controlados como currais ou estufas, a aplicação de dispositivos não é, na maioria das vezes, um trabalho tão desafiador. Neste casos, as soluções podem lançar mão do uso de tecnologias mais simples e de menor alcance, como é caso do IEEE 802.11, por exemplo. Além disso, não se descarta a possibilidade de se utilizar cabos para a transferências dados. Como nestes locais, na maioria das vezes, não há uma restrição relacionada ao acesso à energia elétrica, os problemas com consumo de energia acabam por ser ignorados.

No entanto, quando há a necessidade de se desenvolver soluções para grandes áreas a céu aberto, esta problemática se torna mais complexa. No primeiro exemplo citado, as estações agrometeorológicas precisam estar em constante contato com um servidor para enviar os dados coletados. Para tal, faz-se necessário que ambos possuam algum meio de comunicação estável e seguro. Porém, muitas vezes as estações encontram-se em locais sem a cobertura da infraestrutura de telefonia móvel e a quilômetros de distância do ponto de acesso à Internet que, a depender da tecnologia utilizada, é caracterizado por um *gateway*².

Considerando os fatores físicos, seria possível a utilização de cabos, entretanto as desvantagens e dificuldades na instalação tornam esta abordagem praticamente inviável. O uso de cabos metálicos ou ópticos, por exemplo, resultariam em custos elevados com os cabos em si, custos com repetidores (no caso de cabos metálicos) e custos para realizar a instalação (subterrânea ou aérea) dos cabos, uma vez que é comum o trânsito de máquinas pesadas nas lavouras. Levando-se em consideração que a topografia do local podendo ser diversa, contendo rios, montanhas ou depressões, as dificuldades e custos de instalação aumentam significativamente. Além disso, uma instalação realizada nestes moldes (utilizando cabos) impediria a flexibilidade de realocação das estações agrometeorológicas para outros locais da lavoura sem que houvesse um custo de reinstalação. Por estes motivos, a adoção de tecnologias de comunicação sem fio (*wireless*) de longo alcance apresentam-se como as soluções mais adequadas.

Ao eliminar o uso de cabos, sejam estes de comunicação ou de alimentação, outro ponto crucial a ser avaliado no desenvolvimento de uma solução IoT surge, o consumo de energia elétrica dos dispositivos. Neste casos, como faz-se necessário o uso de baterias, utilizar dispositivos e tecnologias que permitam um aumento da sua autonomia torna-se crucial. Dependendo do consumo da aplicação e da carga máxima da bateria é possível ficar anos sem a necessidade de uma troca. Soluções IoT para o agronegócio comumente fazem uso de placas fotovoltaicas para aumentarem a autonomia das baterias de seus dispositivos.

Desta forma, conclui-se que para um real aproveitamento e adequação de tecnologias IoT aos problemas em campo aberto do agronegócio, faz-se necessário o uso de tecnologias de comunicação sem fio que, além de possibilitarem uma ampla área de cobertura (tipicamente $> 1\text{Km}$), também possibilitem um baixo consumo de energia. Sendo assim, direciona-se os estudos para as tecnologias classificadas como LPWAN (Liya e Arjun 2020).

²O *gateway* é um equipamento que faz a ligação entre duas ou mais redes distintas.

2.3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

No contexto da informática, uma rede consiste em um grupo de dispositivos conectados com a capacidade de compartilhar dados e interagir entre si. Estas interações acontecem em diferentes níveis e escalas dependendo do objetivo e das necessidades da situação. Uma LAN (*Local Area Network*), caracteriza-se por ser uma rede local comumente dentro de um mesmo espaço físico e com as máquinas conectadas por fios, é uma solução adequada para escritórios, escolas e até residências. Já uma MAN (*Metropolitan Area Network*) refere-se a uma rede de escala muito maior, neste ponto a rede não está restrita a um único local mas sim a uma cidade inteira, sendo uma solução viável para uma empresa com muitas filiais em diferentes pontos de uma cidade por exemplo.

Dentre os diversos tipos de rede existentes, encontra-se o LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), em tradução livre, Rede de Área Ampla de Baixa Potência (Figura 3). É uma rede projetada para ter uma grande área de cobertura, um baixo consumo de energia sem o uso de fios e com taxas de transferência moderadas. Seu uso tem ganhado força e espaço com o advento de tecnologias IoT, pois suas características se encaixam perfeitamente às necessidades requeridas por estas soluções (Muteba et al. 2019).



Figura 3. Exemplos de soluções com uso de LPWAN (Yu 2022).

Tanto soluções urbanas quanto rurais têm grande proveito deste tipo de rede, pois mesmo não havendo uma necessidade em economizar bateria, a praticidade de possuir uma comunicação sem fios e centralizada de diversos dispositivos simultaneamente é de extrema valia. Redes LPWAN utilizam topologia em estrela, logo os dispositivos conectados respondem diretamente a um único ponto de acesso, possibilitando que o mesmo faça a gerência dos dispositivos de forma mais democrática e controlada. A topologia em estrela por si, prevê a utilização de um ponto central, que serve como estação principal de comunicação. Esta, por sua vez, faz a comunicação ponto a ponto entre todas as demais estações presentes na rede. Este ponto central é chamado de *gateway* e ele é o responsável pelo acesso à Internet do sistema.

A maioria das tecnologias LPWAN utilizam duas técnicas de transmissão diferentes, UNB (*Ultra Narrow Band*) e SS (*Spread Spectrum*) (Naik 2018). Ambas são baseadas

em comunicação via radiofrequência, onde ondas eletromagnéticas são propagadas sem depender de meios físicos como cabos. Qualquer dispositivo final (*end-node*) baseado nestas tecnologias que se encontre dentro da área de cobertura é candidato a receber e/ou enviar mensagens para se comunicar com o *gateway* ou, em alguns caso, diretamente com outros *end-nodes*.

Como trata-se de uma comunicação via radiofrequência, a utilização das faixas de transmissão é um ponto importante a ser ressaltado, pois a mesma pode ser ocupada e possuir diferentes usos dependendo do país. As faixas de transmissão funcionam de forma semelhante a uma estrada por onde os dados passam. Caso determinada faixa encontre-se ocupada com algum protocolo de comunicação e outro tente utilizá-la, ocorrerá uma colisão entre os sinais resultando em uma possível perda total nos dados transmitidos. Por conta disto, cabe à legislação de cada país determinar quais faixas podem ser utilizadas para determinados serviços. Existem, por exemplo, serviços militares que ocupam determinadas faixas proibindo que qualquer outro serviço legalmente use a mesma.

Dados televisivos e radiofônicos são outros bons exemplos de comunicações que utilizam faixas de transmissão. Desta forma, há um cenário em que o uso dos caminhos necessita ser monitorado e regido estando a utilização de uma determinada faixa dependente da legislação em vigor em cada país. Todavia, a fim de não barrar o desenvolvimento tecnológico, em 1985 o FCC (*Federal Communications Commission*), órgão regulador das áreas de telecomunicações e radiodifusão, delimitou algumas faixas para desenvolvimentos livres (Figura 4). Estes são por sua vez conhecidos como ISM (*Industrial, Sientific and Medical*) e delimitam quais faixas podem ser utilizadas sem a necessidade de uma licença específica. Logo, quando se refere à uma faixa não licenciada, está se referindo diretamente ao ISM, utilizado por muitas redes LPWAN.

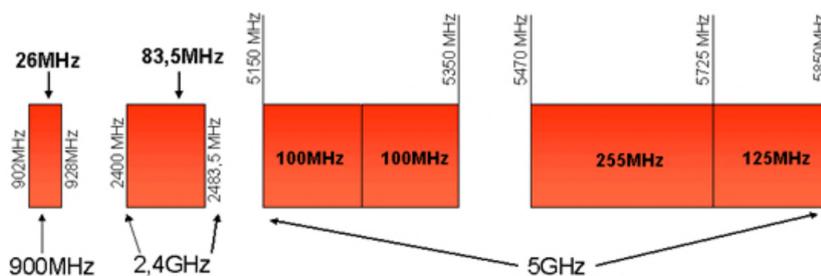


Figura 4. Faixas de frequência ISM licenciadas no Brasil (Teleco 2021).

O envio de mensagens LPWAN depende muito do protocolo de comunicação utilizado, podendo variar desde o tamanho das mensagens, taxa de transmissão, até a sua área de cobertura.

A rede *Sigfox* por exemplo, utiliza a técnica de transmissão UNB com faixas de 100 Hz de largura de banda em regiões como Europa e Japão, e de 600 Hz em regiões como Américas e Oceania. Suas principais bandas base de operação são entre 868 MHz e 868,2 MHz em regiões da Europa e entre 902 MHz e 928 MHz no restante do mundo, salvo algumas exceções. As mensagens dentro da rede *Sigfox* podem ter um *payload*³

³*Payload* é um termo utilizado em redes de computadores para referenciar o tamanho de uma mensa-

máximo de 12 *bytes* e possuem um custo associado (ex.: a assinatura anual para o envio de duas mensagens por dia por dispositivo é de US\$ 0,50). Logo, é necessário, além de adquirir e dotar os dispositivos *end-nodes* com antenas e módulos de comunicação *Sigfox*, também possuir uma assinatura anual para o uso da infraestrutura de comunicação, caso a mesma encontre-se disponível na região onde se deseja utilizá-la. Desta forma, além de a comunicação possuir um custo mensal associado à sua utilização, o seu uso também está condicionado à disponibilidade da mesma no local (Lavric et al. 2019).

Outros dois protocolos existentes igualmente relevantes para o cenário IoT são o NB-IoT (*Narrowband IoT*) e LTE-M (*Long Term Evolution for Machines*). Ambos são variantes do 4G, porém utilizam banda estreita para a transmissão de dados, o que os caracteriza como redes LPWAN, possuindo um longo alcance e uma longevidade em suas baterias. Utilizam a mesma infraestrutura de redes de telefonia móvel tradicionais como Edge, 3G e 4G, portanto não necessitam de uma instalação de antena particular como no caso do *Sigfox*. Porém, isto torna a aplicação refém da cobertura de antenas telefonia móvel. Outro ponto relevante é a sua frequência base de operação de 700 MHz, resultando em uma capacidade de penetração relativamente alta e em uma área de cobertura de 20 a 50 quilômetros em média.

O uso de tecnologias LPWAN permite que soluções IoT adotem sistemas de comunicação sem fio, de ampla área de cobertura e com um baixo consumo de energia elétrica. A transmissão de dados ocorre por radiofrequência e a faixa utilizada está sujeita à legislação e regulamentação do país em que se encontra. São tipicamente organizadas em uma topologia estrela possuindo um dispositivo central denominado *gateway* que provê acesso à Internet ao conjunto de dispositivos finais (*end-nodes*), que encontram-se dentro da sua área de cobertura. Duas características que podem ser consideradas limitadoras no emprego de algumas tecnologias LPWAN, como as apresentadas até o momento, são: i) a necessidade de um infraestrutura de antenas pré-existente, comumente controlada por empresas de telecomunicações, e; ii) o pagamento mensal para o uso desta infraestrutura de comunicação. Uma das principais tecnologias LPWAN que possibilita transpassar estas limitações é o LoRa, foco deste estudo e detalhado na seção seguinte.

2.4. LoRa/LoRaWAN

Primeiramente, é necessário compreender a diferença entre LoRa e LoRaWAN. LoRa trata-se diretamente da tecnologia de radio frequência que realiza a transmissão dos dados, já LoRaWAN é o nome do protocolo que define a arquitetura do sistema e faz uso da tecnologia LoRa para gerir e conectar a rede. De acordo com o modelo de referência OSI (*Open System Interconnection*) a tecnologia LoRa faz parte das camadas física e de enlace enquanto que o protocolo LoRaWAN faz parte da camada de rede (Bor et al. 2016), conforme demonstrado na Figura 5.

A camada física, onde atua a tecnologia LoRa, possui correção de erros FEC (*Forward Error Correction*) que permite verificar se todos *bits* de informação transmitidos foram recebidos corretamente. Basicamente o processo consiste em alguns símbolos redundantes adicionados à mensagem. Apesar do aumentar o tempo de transmissão e ocupação de banda o mesmo garante mais robustez e previne que ruídos afetem as men-

gem, este desconsidera o cabeçalho de transmissão e outras informações adicionais referente ao protocolo utilizado, só é considerado o tamanho do dado a ser transmitido.

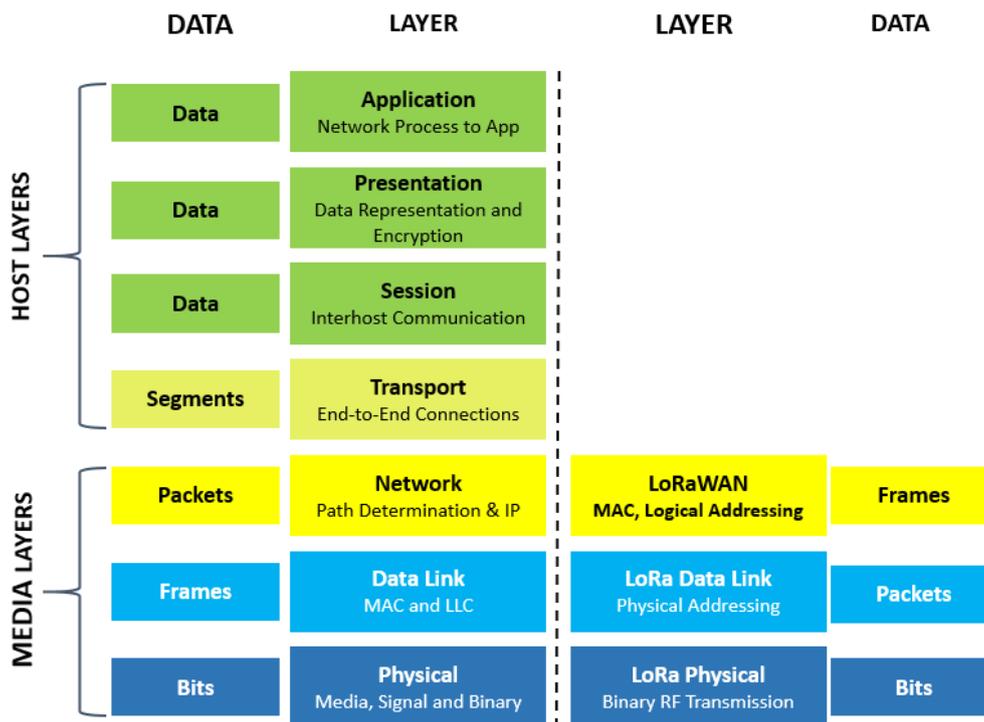


Figura 5. Modelo OSI com tecnologia LoRa (Alliance 2021).

sagens. A modulação do sinal por sua vez utiliza CSS (*Chirp Spread Spectrum*), uma técnica de espalhamento espectral que consiste em enviar dados através de pulsos *chirp*⁴ modulados em frequência linear para codificar informações (Rachkidy et al. 2018).

A tecnologia faz uso de faixas de frequências ISM não licenciadas, o que facilita sua implementação e diminui significativamente seu custo. Como citado anteriormente, a faixa de transmissão utilizada depende da legislação do país regente, por exemplo, a rede LoRa opera entre 902 e 928 MHz nos Estados Unidos enquanto na Europa opera entre 863 e 870 MHz. No Brasil é seguido o padrão Australiano que opera entre 915 e 928 MHz. Por operar em sinais de baixa frequência, a rede consegue manter menores atenuações e prover um sinal de maior robustez e confiança.

Um equipamento LoRa possui quatro parâmetros principais para configuração: i) onda portadora (*Carrier Frequency - CF*); ii) fator de propagação (*Spreading Factor - SF*); iii) largura de banda (*Bandwidth - BW*), e; iv) taxa de código (*Coding Rate - CR*). A configuração destes parâmetros é de extrema valia, pois determina a área de cobertura, o consumo de energia e a qualidade da transmissão, logo é necessário um estudo detalhado sobre quais configurações utilizar em determinada aplicação.

A onda portadora é a frequência central utilizada para a transmissão dos dados. O módulo SX1276, por exemplo, consegue trabalhar de 137 até 1020 MHz. Se tratando de uma aplicação LoRa no Brasil, o módulo deverá ser configurado para operar entre 915 e 928 MHz, obedecendo assim a legislação brasileira.

⁴Um pulso *chirp* consiste em um sinal cuja frequência varia entre Up-chirp e Down-Chirp, traduzidos eventualmente para bit "zero" ou "um".

O fator de propagação é taxa de *bits* existentes na modulação. Ele representa diretamente a duração de um *chirp*, logo, quanto maior a quantia de dados transmitidos em cada *chirp*, ele também aumenta a duração de tempo que a mensagem fica no ar. O número de *chirps* presentes pode ser calculado pela seguinte fórmula: 2^{SF} . Por exemplo, com um fator de propagação 10 (SF10) possui um total 1024 possíveis valores que um *chirp* pode assumir. No LoRa são definidos um total de seis fatores de propagação, variando de SF7 até SF12. Quanto maior o SF, maior o *chirp* enviado. Seu tempo aumenta proporcionalmente assim como sugere a potência, sendo o inverso também é verdadeiro. Quanto menor for o SF, menor será o *chirp* enviado e menor o tempo no ar. Um detalhe importante é que sinais transmitidos na mesma faixa, mas com fatores de propagação diferentes, não interferem um no outro, enxergando sinais com diferentes SF como ruído.

A largura de banda (BW) determina qual o tamanho das frequências que a rede irá utilizar para transmitir as mensagens e, portanto, informa quantos dados conseguem ser transmitidos por segundo. Com este parâmetro, o fator de propagação, é possível medir a quantia de dados transmitidos, pois o tamanho das mensagens é conhecido bem como a frequência em que os mesmos são enviados. O módulo SX1272, comumente usando em soluções LoRa, possui três larguras de banda configuráveis, 125, 250 e 500 KHz, funcionando para *uplink* e *downlink*.

A taxa de código faz referência à correção de erros FEC. Caracteriza-se como um número que indica a quantia de checagens e símbolos de correção que a mensagem possui. Logo, interfere diretamente na velocidade que a mensagem é lida, pois uma mensagem com muita verificação de erros tende a ser maior e, portanto, levar mais tempo para ser decodificada em seu destinatário. Porém, também possui uma garantia maior de não possuir erros.

O Protocolo LoRaWAN por sua vez, define a arquitetura do sistema, definindo os parâmetros para realizar a comunicação da tecnologia LoRa, realizar a codificação e a decodificação de mensagens recebidas, ditar a estrutura dos pacotes e a topologia da rede. Este, por sua vez, cria um padrão para as mensagens possibilitando que mensagens enviadas entre dispositivos LoRa possam, de forma segura e burocrática ser protocoladas a fim de realizar comunicação. A principal função do protocolo é criar um padrão que deve obrigatoriamente ser seguido no momento em que uma mensagem LoRa é construída.

Todo pacote de *uplink* ou *downlink* no protocolo LoRaWAN deve começar um preâmbulo que identifica o início de um pacote. Este, por sua vez, possui o tamanho fixo de 8 símbolos e funções informativas e receptivas aos sensores de rádio frequência. Seguidos do preâmbulo, a estrutura de um pacote consiste em um cabeçalho da camada física com um campo CRC responsável pela verificação da integridade das informações do cabeçalho, um campo de *payload* denominado de *PHYPayload* e por fim um campo de CRC que realiza a validação do *payload*. A única diferença entre pacotes de *uplink* e *downlink* está no ultimo campo de CRC que realiza a validação do *payload* que não esta presente nos pacotes de *downlink*.

A topologia aplicada pelo protocolo é a estrela, onde o *gateway* atua como antena emissora e estação principal enquanto os dispositivos finais (*end-node*), atuam como estações secundárias. A comunicação é centralizada, todo dado transmitido de um sensor obrigatoriamente deve passar pelo *gateway*. Na maior parte das aplicações, o *gateway*

não faz requisições para as estações secundárias, são as estações que enviam dados para o *gateway* de acordo com suas possibilidades. Isto ocorre para que os *end-node* possam permanecer parcialmente desligados na maior parte do tempo, a fim de poupar o máximo de bateria possível, só ligando os módulos de comunicação quando vão de fato realizar o envio de mensagens.

Existem 3 classes de dispositivos finais de LoRa, respectivamente classe A, B e C. Todos os dispositivos LoRa devem implementar obrigatoriamente a classe A enquanto as classes B e C são extensões e dependem da aplicação. A classe A refere-se à dispositivos finais com comunicação bi-direcional que conseguem enviar dados a qualquer momento. O dispositivo escolhe um canal e envia a mensagem para o *gateway* e abre duas janelas aguardando um *acknowledgment*⁵. Caso não receba uma resposta, ele aguarda um novo ciclo para enviar a mensagem novamente, o *gateway*, após receber a mensagem com sucesso, envia a confirmação para uma das duas janelas abertas no dispositivo, garantindo que ambas as partes recebam a confirmação da mensagem. Isto acontece a fim de economizar energia no dispositivo final, visto que o mesmo só fica apto a receber mensagens após enviar uma ao *gateway*. Assim, os *end-nodes* podem passar a maior parte do seu tempo desligados ou operando com o mínimo de sua capacidade. Um exemplo de dispositivo classe A é um alarme de incêndio, que só dispara a mensagem quando é acionado.

Na classe B, os dispositivos finais abrem janelas de recepção periodicamente para que o *gateway* possa enviar mensagens aos *end-nodes* em intervalos específicos. As janelas de comunicação também são abertas após o envio mensagens assim como na classe A, da mesma forma elas esperam receber um *acknowledgment* e caso não recebam esperam um novo ciclo para enviar a mensagem. Um exemplo de dispositivo classe B são estações agrometeorológicas que precisam reportar a situação do clima com periodicidade mas que também precisam receber comandos da infraestrutura central para acionar bicos de irrigação. Soluções classe B comumente consomem mais bateria, pois têm uma maior comunicação com o *gateway*, ao contrario da classe A, que apenas abre o canal de comunicação apenas após o envio de uma mensagem.

Por fim, a classe C é indicada para soluções que não possuem restrições com energia, pois os *end-nodes* mantêm janelas de comunicação abertas o tempo todo com o *gateway*, assim como é feito no padrão IEEE 802.11. Enquanto que nas classes A e B, o dispositivo fica apto a receber mensagens somente após enviá-las ou em determinado período, na classe C o dispositivo mantêm a conexão aberta o tempo todo consumindo muito mais bateria. Dispositivos classe C, como um todo, são recomendados para soluções que possuem um tempo de resposta crítico e/ou que não possuem restrições de energia.

2.5. *The Things Network* (TTN)

A TTN foi fundada em 2015 como uma empresa sem fins lucrativos, seu principal setor é o de telecomunicações e possui sede atualmente em Amsterdam, Holanda. Suas áreas de atuação estão fortemente conectadas ao IoT e ao LoRa/LoRaWAN. Um dos maiores feitos desta instituição foi gerar a rede TTN, que atualmente conta com milhares de *gateways* LoRaWAN conectados pelo mundo, além de milhares de contribuintes. Ela é

⁵*Acknowledgment* é um termo utilizado em redes que informa a um processo que uma mensagem chegou sem erros ao destinatário.

caracterizada por ser uma rede aberta e colaborativa.

A rede TTN é baseada em *cloud servers* e conecta *gateways* LoRaWAN por todo o mundo. Um *gateway* assim que devidamente cadastrado na rede TTN passa a ser um contribuinte para a rede toda. Diferente de uma rede telefônica tradicional, que oferece um serviço pago e centralizado, a rede TTN trabalha com o conceito de cobertura gratuita fornecida e mantida pelos próprios usuários. Todo *gateway* cadastrado é de uso público e, qualquer mensagem LoRa que chegue no mesmo, independentemente de seu remetente, é recebida, tratada e devidamente encaminhada para a rede TTN.

Qualquer pessoa pode comprar um *gateway* LoRaWAN e mantê-lo em sua residência em funcionamento, devidamente conectado à Internet e cadastrado na rede TTN. Assim, ele pode, por exemplo, receber dados LoRa de um *drone* que estava passando pela região realizando avaliações de temperatura e os encaminhar diretamente para a rede TTN. Esta rede, por sua vez, consegue reconhecer o endereço de destino das mensagens recebidas e as encaminhá-las para o seu destino definitivo. Desta forma, qualquer pessoa pode atuar como um contribuinte para a rede TTN.

Os elementos da rede TTN são caracterizados em 3 níveis: i) *end-nodes*; ii) *gateways*, e; iii) aplicações. Os *end-nodes* são dispositivos LoRa que transmitem e recebem sinais nas frequências dispostas perante o protocolo LoRa e atendem às especificações da construção das mensagens. Os *gateways* são os dispositivos que realizam a interconexão da rede LoRa com a Internet, encaminhando as mensagens para a rede TTN. Na rede TTN, as mensagens são encaminhadas para uma aplicação. Esta aplicação é baseada no protocolo MQTT com dados no formato JSON e é responsável por realizar o encaminhamento das mensagens ao servidor de armazenamento de dados da aplicação final (aquela que gerencia a regra de negócio).

2.5.1. TTN Mapper

Com a finalidade de melhorar a experiência dos usuários e facilitar a identificação de locais para o envio e recepção de dados, foi desenvolvido o TTN Mapper⁶. Este, por sua vez, baseia-se numa infraestrutura online e gratuita que a partir de mensagens recebidas por *gateways* cadastrados, gera um mapa de calor identificando quais locais possuem melhor recepção de sinal.

O site disponibiliza um mapa-múndi utilizando *layers* do projeto de mapeamento colaborativo *OpenStreetMap* (Figura 6). Nele é possível visualizar nomes de ruas, cidades e países, além da possibilidade de alternar entre mapas políticos e imagens de satélite. O site conta com a exibição de *gateways* ativos, sendo estes representados pelo ícone azul de formato circular com varias pastas empilhadas horizontalmente, é possível ver também alguns *gateways* inativos representados estes pelo mesmo ícone mas na cor vermelha.

Um *gateway* ativo pode, ou não, apresentar um mapa de calor. Caso o mesmo esteja ativo mas nenhuma aplicação detentora de um módulo GPS⁷ tenha enviado uma mensagem à ele, não será gerado um mapa de calor da mensagem recebida.

⁶Acessível em <https://ttnmapper.org/heatmap/>

⁷*Global Positioning System - (GPS)* é um sistema de posicionamento global que utiliza satélites na órbita terrestre para indicar o posicionamento no globo.

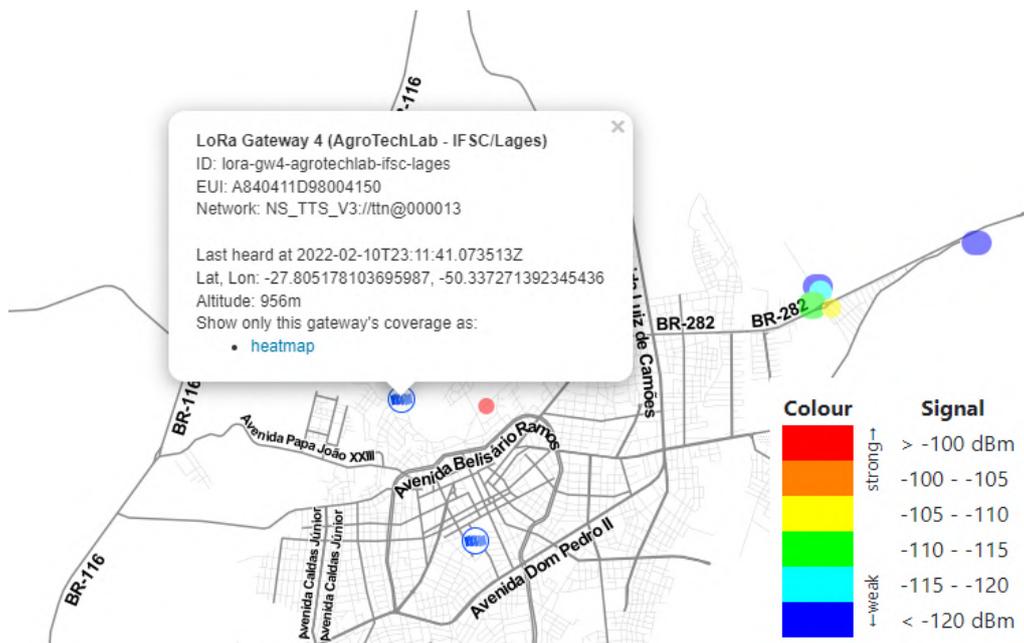


Figura 6. TTN Mapper da região de Lages/SC (TTNMapper 2022).

Um mapa de calor é representado por círculos semitransparentes de cores específicas, caso uma mensagem seja enviada de um ponto uma área próxima ao local de envio é preenchida com a cor referente a qualidade do sinal. Estes pontos coloridos se sobrepõem com o sinal mais forte e com o conjunto de muitas amostras é formado um mapa fiel e bem estruturado dos locais com melhor conectividade LoRa. Um bom exemplo de cidade já mapeada é a cidade de Berlim, Alemanha.

A cor vermelha simboliza um sinal maior que -100 dBm⁸, a laranja um valor entre -100 e -105 dBm, a amarela um valor entre -105 e -110 dBm a verde um valor entre -110 e -115, o ciano um valor entre -115 e -120 dBm e azul é um valor menor que -120 dBm.

O preenchimento do mapa é feito de forma automática, assim que uma mensagem com localização de GPS é recebida por um *gateway*. A fim de burlar a necessidade de utilizar um módulo GPS diretamente conectado ao módulo LoRa, existe a possibilidade de cadastrar um dispositivo TTN no aplicativo TTNMapper disponível para Android e, a partir da localização GPS do celular é gerado um ponto no mapa de calor. O aplicativo Android disponibiliza ainda um arquivo CSV⁹ contendo diversas informações pertinentes ao estado que as mensagens chegaram.

2.6. Trabalhos correlatos

Como citado na seção 2, soluções IoT têm ganhado cada vez mais espaço na sociedade visto suas comodidades e feitos. Existe um grande interesse industrial e acadêmico em desenvolver tecnologias cada vez mais acessíveis e com melhores desempenhos. Por conta disto, nos últimos anos, diversos trabalhos foram realizados testando diferentes protocolos e tecnologias a fim de chegar em conclusões, que auxiliam a definir quais

⁸dBm é uma unidade de medida para indicar intensidade de sinal

⁹CSV é um formato de arquivo que significa “comma-separated-values”, comumente utilizado em aplicações de mineração de dados, pois permite fácil manuseio para grade volume de dados.

tecnologias são mais apropriadas para determinadas situações e sob quais circunstâncias elas devem ser exploradas e utilizadas.

O artigo (Islam et al. 2020) propõe uma análise entre diferentes redes LPWANs. O principal tema abordado é se as soluções IoT para *Smart Farming* têm realmente como melhor solução redes LPWAN e quais destas soluções apresentam melhores resultados. São apresentados alguns pontos enaltecendo o uso redes LPWAN para soluções IoT e então diversos pontos positivos e negativos de redes como *Sigfox*, *LoRa* e *NB-IoT* foram citados e avaliados. Por fim, características como alcance, durabilidade de bateria, latência, qualidade do serviço e escalabilidade foram colocadas em pauta, debatidos e registrados em tabelas comparativas. Como conclusão, o artigo propõe que para soluções em *Smart Farming* a tecnologia LoRa, possui vantagens em relação as demais redes e, por conta disso, a classificam como a mais apropriada para o uso rural.

Outro exemplo do uso da tecnologia LoRa sendo explorada e testada, encontra-se no artigo (Mushtaq et al. 2020). Este, por sua vez, realiza testes em relação ao tamanho das antenas emisoras e propõe qual é o tamanho ideal para uma antena utilizada na Índia com frequência base de 433 MHz. Uma questão interessante, que deve ser contabilizada, é o local dos testes. Pois a tecnologia LoRa não utiliza as mesmas faixas de transmissão na Índia e no Brasil. Logo, é possível que soluções distintas se apresentem na Índia e no Brasil.

O trabalho (Rossato et al. 2020) realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) apresenta diversos testes e métricas para a instalação de uma rede LoRa na cidade de Toledo/PR. O artigo realizou uma pesquisa sobre as funcionalidades e capacidades que a rede demonstra em uma cidade e fez considerações de projetos de expansão consideráveis para uma rede LoRa completa.

O número de aplicações utilizando a tecnologia LoRa têm crescido de forma considerável nos últimos anos, possuindo aplicações em diversas áreas. O trabalho (Li et al. 2017) realiza uma pesquisa para monitorar o manejo e locomoção de veleiros na região de Shanghai, China. Este artigo mostrou dados promissores e concluiu que um sistema LoRaWAN é capaz de monitorar veleiros em lagos da região.

Soluções para o agronegócio citadas na seção 2.2 representam um numero significativo de aplicações que utilizam a tecnologia LoRa/LoRaWAN. Por tratar-se de uma tecnologia de fácil acesso e baixo custo, a mesma vem ganhando espaço considerável no meio acadêmico e industrial, com a publicação de diversas pesquisas, como (Islam et al. 2018a) e (Islam et al. 2018b).

O trabalho (Di Renzone et al. 2021) realizado Universidade de Siena, Itália, buscou realizar uma gama de testes semelhantes aos propostos neste documento, entretanto sua principal preocupação foi referente à velocidade em que o dispositivo que dispara as mensagens está se locomovendo. Utilizando uma pista automotiva profissional foram testadas diversas configurações LoRa variando entre as velocidades de locomoção de 20 Km/h até 60 Km/h, e mais alguns testes adicionais com uma velocidade de 90 Km/h.

O artigo (Petrariu et al. 2019) realizou a instalação completa e comparação de duas arquiteturas LoRa/LoRaWAN, uma em perímetro urbano e outra em área rural. Ao utilizar os mesmos equipamentos, foi possível constatar de forma explícita a diferença existente entre as duas área. A 2,5 Km de distância, os equipamentos não conseguiam tro-

car nenhuma mensagem no perímetro urbano, enquanto que em área rural, para a mesma distância, as comunicações mantiveram-se com menos de 17% de perdas no envio das mensagens.

3. Solução Proposta

O objetivo deste trabalho é realizar testes automatizados em uma infraestrutura de comunicação baseada na tecnologia LoRa/LoRaWAN para auxiliar na decisão do conjunto de configurações mais adequado a ser utilizado nos dispositivos *end-nodes*.

Neste contexto, foi utilizada a linguagem de programação Python para o desenvolvimento de um *software* que, através de um protocolo de comunicação serial utilizando a porta USB de um computador, é responsável por enviar e receber comandos no formato AT¹⁰ para um módulo LoRa/LoRaWAN. Este módulo opera de forma similar aos *end-nodes* de uma aplicação IoT.

Os dados transmitidos pelo módulo do *end-node* são recebidos por um *gateway* LoRa/LoRaWAN. Ao receber estas mensagens, o *gateway* realiza um conjunto de análises e as envia para um servidor através da infraestrutura de comunicação provida pela rede TTN (*The Things Network*). O servidor recebe, organiza e fornece uma interface de apresentação dos conjuntos de análises recebidas do *gateway* (Figura 9).



Figura 7. Diagrama de comunicação.

3.1. Estruturas e Dispositivos

Para a realização dos testes foi utilizado um notebook para a execução do programa desenvolvido. O módulo LoRa/LoRaWAN RHF76-052 foi conectado ao notebook através da porta USB para receber os comandos AT. Esta conexão foi realizada utilizando-se uma placa conversora USB/Serial FTDI, que atua com o chip FTDI FT232R. O módulo FTDI é conectado ao dispositivo através de um cabo USB tipo mini que permita a transmissão de dados e energia, alimentando e viabilizando a transmissão de dados, o módulo LoRa/LoRaWAN é conectado ao FTDI através de cabos *jumper*. O notebook não carece de conectividade com a Internet e dispensa quaisquer outras funcionalidades além das citadas. Desta forma o programa em Python desenvolvido pode ser executado dando início ao processo de comunicação proposto para a realização dos testes. Ademais, foi utilizada uma antena SMA de 915 MHz e 3 dB conectada ao módulo LoRa/LoRaWAN. Os materiais (com exceção do notebook) utilizados no *end-node* são apresentados na Figura 8.

Uma vez que a mensagem é disparada ela percorre o meio como uma onda eletromagnética, podendo colidir com qualquer obstáculo que encontrar. Logo, locais com

¹⁰Os comandos AT (*attention*), também chamados de comandos Hayes, foram inicialmente desenvolvidos por Dennis Hayes em 1981 para serem utilizados no modem Hayes Smartmodem 300 bauds, mas atualmente são amplamente utilizados para a configuração de dispositivos embarcados.

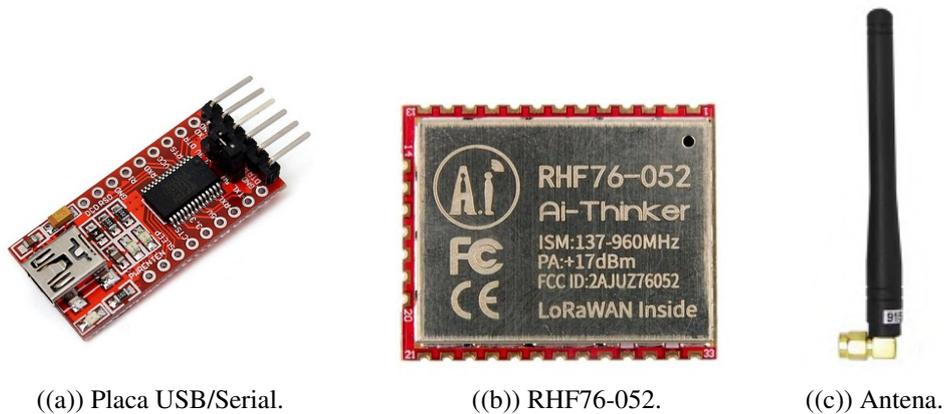


Figura 8. Materiais do *end-node*.

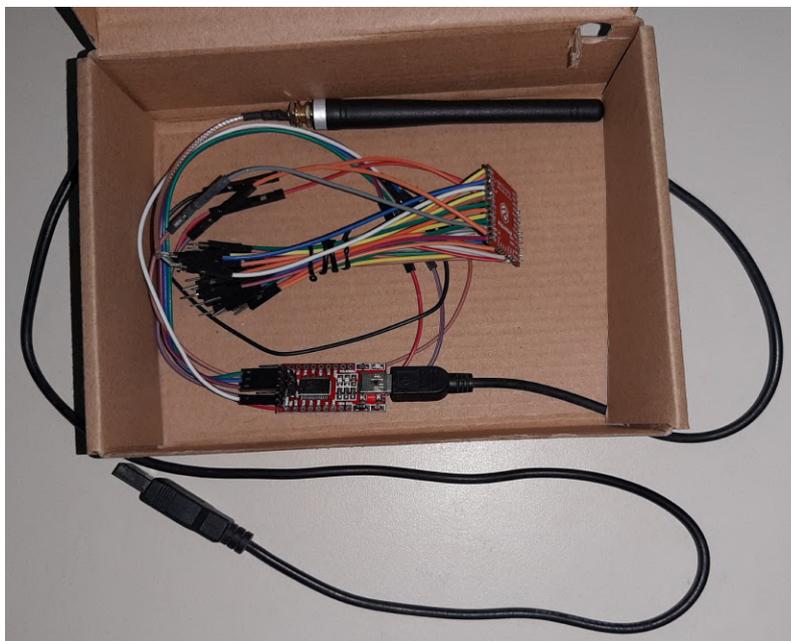


Figura 9. Imagem dos equipamentos utilizados

maior densidade de ruído (outras transmissões nas mesmas faixas de frequência) ou grande quantidade de objetos físicos, como prédios ou montanhas, podem atrapalhar na dissipação da mensagem e dificultar o trajeto até o destino desejado. As mensagens transmitidas pelo módulo LoRa podem ser captadas por qualquer *gateway* LoRa que esteja dentro da área de transmissão da mensagem e esteja apto a recebê-las.

O *gateway* LoRa/LoRaWAN deve estar corretamente configurado e funcionando para que esteja apto e receber e decodificar as mensagens enviadas. Uma vez que a mensagem é devidamente recebida a parte da comunicação que utiliza a camada física LoRa está concluída, a partir deste ponto o *gateway* tem autonomia em relação ao que fazer com a mensagem, podendo retransmitir a mensagem ou armazenar a mesma em um servidor local. Durante a realização dos testes foi utilizado o site TTN para manuseio das mensagens, portanto, o *gateway* necessita ter comunicação com a Internet bem como estar

devidamente configurado e cadastrado na plataforma TTN.

Dentro da plataforma TTN a mensagem é devidamente encaminhada e disposta dependendo de suas configurações, podendo ou não ser encaminhada à uma aplicação. O site conta ainda com o protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT¹¹) integrado, permitindo que diversos tipos de aplicações consigam ter acesso as mensagens caso possuam as chaves de autorização. Portanto, qualquer aplicação que realize um *Subscribe* em um tópico existente no TTN consegue ter acesso ao fluxo de mensagens enviadas à aplicação. As mensagens possuem um formato JSON¹².

3.2. Programa de envio de mensagens

O programa encarregado pela conexão com o módulo LoRa/LoRaWAN e envio das mensagens encontra-se disponível em: <https://github.com/RubensRezende/LoRa-data-sender>. Este, por sua vez, é encarregado de realizar o envio de diversos parâmetros em comandos AT para realizar a configuração do módulo LoRa/LoRaWAN, otimizando e adequando o módulo às necessidades existentes na aplicação, tais como, configuração da banda base, definição da classe do dispositivo, definição da taxa de transmissão, entre outros. A realização do envio das mensagens é feito após a configuração de todos os parâmetros pertinentes à execução.

Parte considerável das configurações é informada no *datasheet*¹³ do módulo enquanto outra parte é preestabelecidas nas diretrizes do protocolo LoRaWAN. Portanto, as configurações utilizadas devem seguir os padrões e normas previamente estabelecidas. As configurações não estabelecidas na especificação LoRaWAN, são de escolha do usuário. Porém, mesmo assim, devem seguir algumas normas para que operem em seu melhor estado e disponham de uma grande taxa de eficiência.

O programa de envio de mensagens realiza uma leitura de um arquivo de configuração JSON e a partir dos dados obtidos, dá início ao processo de configuração do módulo LoRa. Inicialmente o nome da porta serial e o *baudrate*¹⁴ que realizará a comunicação com o notebook são informados. Estes são dados referentes a porta USB da máquina utilizada para enviar as mensagens, são configuráveis dependendo da porta USB utilizada e possui um *baudrate* que necessita ser compatível com o módulo LoRa, no caso do módulo RHF76-052, um *baudrate* de 9600 bps.

Uma vez que a porta serial está devidamente configurada e a comunicação estabelecida é dado o início à configuração específica dos parâmetros LoRa. Neste instante, realiza-se a configuração da banda base de operação do módulo. No caso do Brasil, é utilizado o padrão Australiano, então o comando "AT+DR=AU915" é submetido para que a frequência operante do modulo esteja entre 915 e 928 MHz.

As sub-bandas em que o módulo irá operar também são fundamentais. Para manter

¹¹MQTT é um protocolo de comunicação entre máquinas que utiliza a estrutura *Publish* e *Subscribe*, que permite que um dispositivo se cadastre em um tópico para o envio ou recebimento de mensagens.

¹²JSON é uma abreviação de *JavaScript Object Notation*, é um formato compacto, de padrão aberto independente que permite troca de dados.

¹³*Datasheet* é o documento oficial que informa o desempenho e outras características técnicas de um produto, máquina ou componente, detalha o suficiente para que o equipamento possa ser usado corretamente.

¹⁴O termo *baudrate* é utilizado como medida de velocidade de transmissão de informação entre redes computadores.

a compatibilidade com a rede TTN, foi utilizada a sub-banda 2, tendo sido desabilitados os canais de zero a sete, de dezesseis a sessenta e quatro e de sessenta e seis até setenta e um. A classe do dispositivo foi definida como classe "A" e as janelas de recepção 1 e 2 devidamente configuradas, mantendo a janela 1 ligada e a janela 2 operante em 923.3 MHz. O modo de operação também foi definido como "LWABP".

Por fim, foi realizada a configuração dos parâmetros de segurança e identificação da rede TTN. Estes parâmetros são baseados nos dados gerados pela plataforma TTN ao se cadastrar o dispositivo de transmissão e a aplicação. Neste contexto, são configurados os parâmetros "device EUI", "device adress", "Network Session Key" e "Application Session Key".

Após a finalização das configurações é dado início ao processo que realiza o envio das mensagens. Neste contexto, é definido um número para a quantia de mensagens a serem enviadas e executado o envio das mesmas até que o número de amostras solicitado.

Abaixo é apresentado o código fonte desenvolvido para a realização da conexão entre o computador e a interface LoRa/LoRaWAN e o envio das mensagens:

```
import serial
import time
import logging
import json

#Log declaration
logging.basicConfig(filename="LoRaLog.log",
format='% (asctime)s % (levelname)s - % (message)s', level=logging.INFO)

#Json file reading
with open('LoRaConfigurations.json') as j:
    json_data = json.load(j)
cont = 0

# Serial portt configuration
serialPort = json_data["system"][0]["port"]
baudratePort = json_data["system"][0]["baudrate"]

ser = serial.Serial(serialPort, baudratePort, timeout=0)
print("Communication at", ser.name)
```

As estruturas acima referem-se a parte inicial do código, são realizados os *imports* e declarações necessárias para funcionamento do mesmo. A leitura do arquivo JSON é uma das primeiras etapas pois é necessária para obter os valores de configuração do módulo Lora bem como as configurações da porta serial, em sequencia é realizada a configuração da porta serial utilizada para realizar a comunicação com o módulo FTDI.

```
#LoRa communication parametres
#Baseband
cmd= 'AT+DR='+str(json_data["lora"][0]["base_band"])+ '\r\n'
ser.write(cmd.encode())
time.sleep(0.5)
while True:
    x=ser.read(100).decode()
    if str(json_data["lora"][0]["base_band"]) in x:
```

```

    print("Base band setup complete")
    break
else:
    cont=cont+1
    if cont >= 100:
        print("Base band at LoRa module are not correctly configured,
        trying again")
        cmd= 'AT+DR='+str(json_data["lora"][0]["base_band"])+ '\r\n'
        ser.write(cmd.encode())
        cont=0
        time.sleep(1)

```

A estrutura acima realiza o envio do comando AT para configuração da *Carrier Frequency* (CF) do módulo LoRa. A estrutura necessita de um *loop* pois assim que o comando AT é enviado para o módulo, ela deve receber um retorno do módulo informando que a configuração foi realizada com sucesso. Mediante ao tempo de processamento do módulo e a alguns erros eventuais na leitura do *buffer* de recebimento, foi necessário implantar uma estrutura que garantisse que a configuração seria realizada com sucesso, caso o mesmo não ocorra o terminal permanece exibindo uma mensagem de erro e não continua a execução do código.

Após esta configuração ser realizada com sucesso, a mesma estrutura é repetida quatorze vezes, realizando outras configurações do módulo LoRa, apenas as linhas contendo a leitura do arquivo JSON e as que declaram o comando AT são alteradas. São configurados então, em ordem, *Data Rate*, *Sub Band*, classe do dispositivo, janela de recebimento 1, janela de recebimento 2, modo de operação do dispositivo, quantia de vezes que a mensagem sera repetida em caso de não recebimento, quantia de vezes que o módulo tentara repetir o envio em caso de não recebimento, é realizado então o cadastro de complementos do site TTN, *device EUI*, *device adress*, *Network Session Key* e *App Session Key*.

```

#Test setup
print("Starting test\n-----")
numberMessages = json_data["system"][0]["number_of_messages"]
logging.info("Starting tests with "+
str(json_data["system"][0]["lora_module"]))
cmd= 'AT+MSG='+str(json_data["system"][0]["message"])+'\r\n'
cont=0

for i in range (numberMessages):
    ser.write(cmd.encode())
    time.sleep(0.1)

while True:
    x=ser.read(100).decode('utf-8')
    time.sleep(0.5)
    if "Done" in x:
        break
    else:
        cont=cont+1
        #print(cont)
        if cont >= 20:
            cmd= 'AT+MSG='+str(json_data["system"][0]["message"])+'\r\n'
            ser.write(cmd.encode())

```

```
    cont = 0
cont = 0

print("message complete : %s" % str(i+1))
```

É então realizada a última etapa do código, o envio das mensagens. São recebidas as informações do arquivo JSON da quantidade de mensagens a ser enviadas e conteúdo das mensagens. É uma estrutura semelhante a de configuração de parâmetros, pois a problemática de receber uma mensagem de confirmação do módulo persiste. Possui mais mecanismos de retorno em caso de erro pois como a estrutura se repete diversas vezes, é indispensável que ela não apresente erros durante a execução dos testes. Assim que a estrutura realiza o envio de todas as mensagens o código se encerra.

3.3. Gateway e TTN

O *gateway* LoRa/LoRaWAN é fundamental dentro da arquitetura LoRa, possui a responsabilidade de fazer o intermédio das mensagens LoRa enviadas por um dispositivo *end-node* com a Internet.

Durante a realização dos testes foi utilizado um *gateway* multicanal Dragino LPS8 (Figura 10). Este, por sua vez, é um *gateway* LoRaWAN de código aberto e dispõe de infraestrutura necessária para a captação de mensagens LoRa. Permite o intermédio de uma rede LoRa a uma rede de IP público através dos protocolos *WiFi* ou *Ethernet*, além de possuir fácil configuração para a plataforma TTN.



Figura 10. Gateway LoRaWAN Dragino LPS8 (Store 2022).

Este *gateway* foi conectado à uma antena AP10249 (Figura 11) que é uma antena externa LoRa de 915 MHz e 6 dB. Ambos os equipamentos foram instalados no telhado do IFSC/Lages e conectados à rede de computadores do câmpus via cabeamento Ethernet para a realização do acesso à Internet.

Esta antena amplia significativamente a área de cobertura do *gateway*, porém não possui uma irradiação de sinal padrão e uniforme. A mesma apresenta grandes faixas

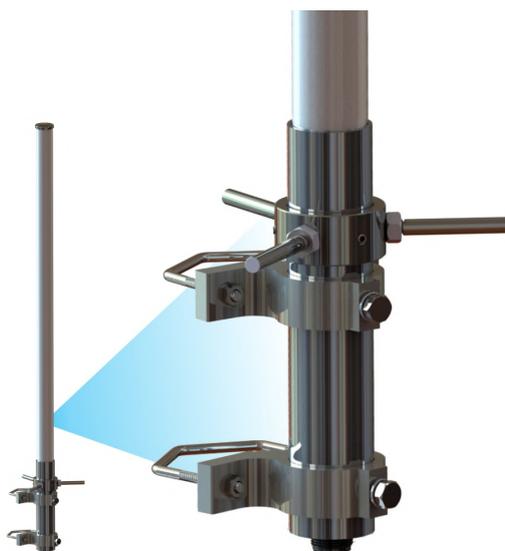


Figura 11. Antena LoRa UHF 6DB 915mhz - AP10249 (Steelbras 2022).

de cobertura para as coordenadas leste e oeste da antena, e algumas para norte, no entanto grande irradiação de sinal ao sul da mesma. A Figura 12 apresenta o diagrama de irradiação da antena em questão.

Após a instalação física, o *gateway* foi cadastrado na plataforma TTN estabelecendo os seguintes dados: i) *gateway ID*, e; ii) *gateway EUI*". Os dados são providos pelo próprio *gateway* assim que configurado. Uma vez corretamente realizado o processo, toda mensagem LoRa recebida pelo *gateway* será encaminhada para a plataforma TTN.

Para realizar a obtenção dos dados de forma automatizada é necessário cadastrar uma *application* dentro da plataforma TTN. A mesma não tem ligação direta com o *gateway* cadastrado na mesma, visto que, o *gateway* apenas encaminha as mensagens para a rede TTN. Cabe a própria rede TTN encaminhar a mensagem para a *application* dependendo das configurações presentes na mensagem. Assim que uma *application* é cadastrada são geradas chaves e IDs que devem ser inseridas no módulo LoRa durante a etapa de configuração citada na seção 3.2.

Os dados em uma *application* podem ser obtidos ao gerar uma *API key*, esta chave é fundamental para o cadastramento da *application* em um tópico MQTT. O tópico MQTT permite que aplicações terceiras consigam obter os dados recebidos pela *application* desde que as mesmas se inscrevam corretamente no tópico MQTT da *application*. Os tópicos variam de recebimento de mensagens, envio de pacotes, pedidos de *join* até situação do tráfego. Assim que inscrito no tópico, toda mensagem recebida pela *application* pode ser adquirida.

3.4. Recebimento de dados

Para realizar a aquisição dos dados foi optado por se utilizar o *software* TTN Mapper em sua versão Android 2021.12.17 (build 34). A aplicação realiza um cadastro dentro

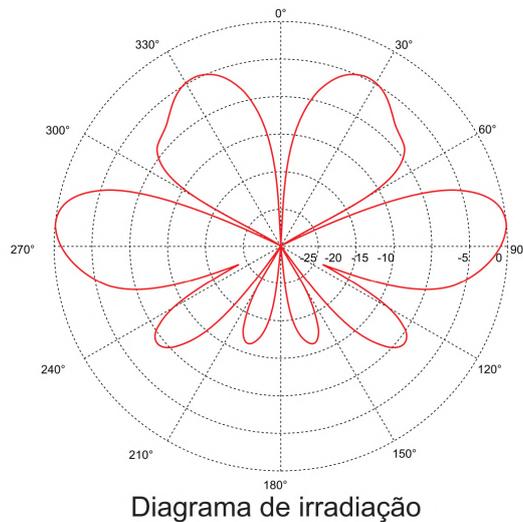


Figura 12. Diagrama de irradiação da antena AP10249 (Steelbras 2022).

de uma API¹⁵ em uma aplicação registrada na plataforma TTN (conforme descrito na seção anterior). Uma vez que o *device Id* e a *API key* são corretamente informados o *software* consegue acesso ao *broker MQTT* da aplicação TTN, permitindo que todo o tráfego enviado pelo dispositivo possa ser lido.

Quando um *end-node* realiza o envio de uma mensagem, a mesma é instantaneamente repassada ao *broker MQTT* da aplicação, portanto, qualquer *software* que realize a conexão com o *broker MQTT* estará apto a adquirir as mensagens enviadas. A aplicação *mobile* TTN Mapper executa a conexão com o *broker MQTT* e passa a receber dados referentes ao fluxo de mensagens.

Para que os dados das mensagens possam ser corretamente captados é necessário que a aplicação possua conexão estável com a Internet e esteja apta a, permanecer executando o *software* durante todo o período que o envio das mensagens venha a perdurar. Para tal, foi utilizado um *smartphone* padrão com acesso à Internet via conexão 4G. As mensagens foram recebidas e dispostas pela própria aplicação *mobile* e armazenadas no formato CSV. O usuário pode então exportar os arquivos CSV referentes às baterias de teste e armazená-los em outro local para uso futuro.

4. Testes e Resultados

Nesta seção são apresentados os principais parâmetros utilizados nos testes realizados bem como são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1. Parâmetros de teste

Para a realização dos testes foram definidos e utilizados 20 diferentes *setups*¹⁶, cada um com suas propriedades e configurações, variando estas entre configurações no módulo

¹⁵Uma API ou *Application Programming Interface*, consiste em uma interface que permite a comunicação e troca de informações entre diferentes sistemas.

¹⁶Setup é um conjunto de características ou configurações que um objeto ou local pode apresentar, setup da BIOS do computador por exemplo faz referencia as configurações sobre a inicialização do computador.

LoRa até locomoções entre diferentes locais. Um *setup* consiste nas configurações do módulo LoRa e no local em que as mensagens serão enviadas. Para cada *setup* foi determinada uma amostra de 500 mensagens.

Devida a infraestrutura disposta, não será possível realizar os testes em área rural como inicialmente o trabalho objetivava. Portanto os mesmos serão realizados na cidade de Lages SC. Com o objetivo de tornar a amostra mais ampla e confiável, foram determinados quatro pontos de amostragem com distâncias distintas na cidade de Lages, estando estes a 1 Km, 2,5 Km, 5 Km e 7,5 Km do *gateway*, respectivamente. As distâncias foram determinadas prezando manter um afastamento uniforme em relação ao ponto de origem, assim garantindo que os pontos de amostragem formem uma linha reta entre o primeiro e o último, conforme apresentado na Figura 13.

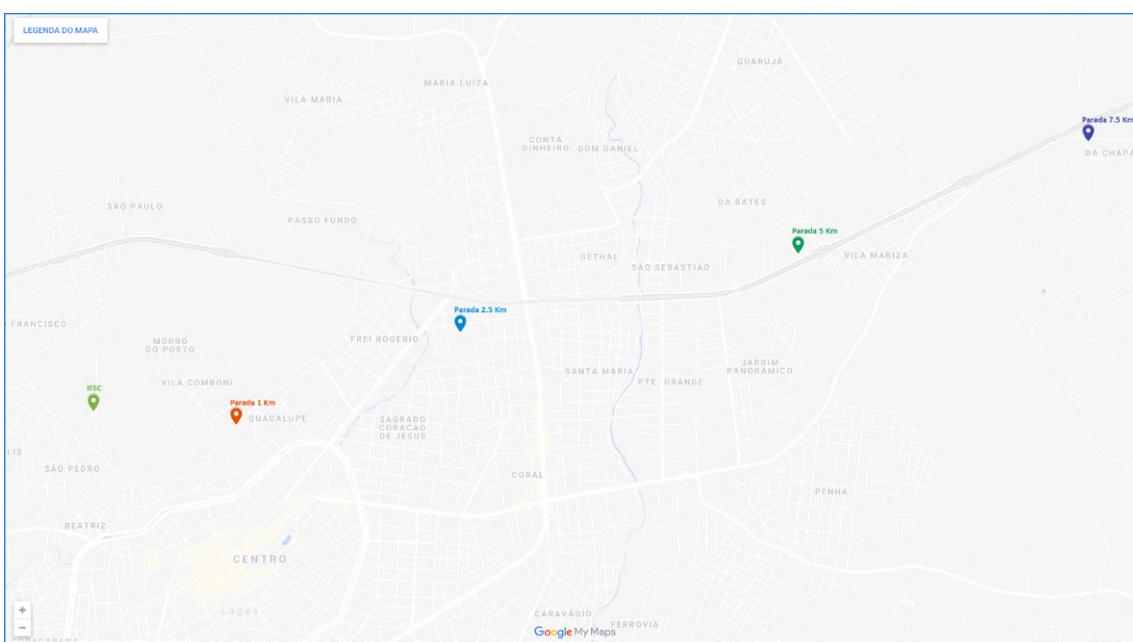


Figura 13. Pontos de amostragem em Lages/SC (Google 2022).

Para cada ponto de amostragem foram executados 5 diferentes *setups*, alternando-se o *Data Rate* (DR) dos parâmetros LoRa de 0 até 4. Como cada DR possui um tamanho máximo de *payload* diferente (Tabela 1), optou-se por se definir um *payload* padrão de 10 bytes para todos os *setups*.

DR	SF	BW	Payload
0	SF10	125 kHz	11 bytes
1	SF9	125 kHz	53 bytes
2	SF8	125 kHz	126 bytes
3	SF7	125 kHz	242 bytes
4	SF8	500 kHz	242 bytes

Tabela 1. Detalhes dos *Data Rate*, padrão AU915OLD.

Desta forma, foram estabelecidos um total de 20 diferentes *setups* que podem ser divididos em quatro grupos caracterizados pela distância do *gateway*. A tabela 2 mostra

em ordem, o número do *Setup*, a *Carrier Frequency* - CF, o *Data Rate*, o *Spreading Factor* - SF, a *Bandwidth* - BW, o *Coding Rate* - CR, a distância do *gateway*, o tamanho do *payload* da mensagem e o *power* (em dB) que o dispositivo estava configurado.

Setup	CF	DR	SF	BW	CR	Gateway dist.	Payload	Power
1	AU915OLD	0	SF10	125 kHz	4/5	1 Km	10 bytes	20
2	AU915OLD	1	SF9	125 kHz	4/5	1 Km	10 bytes	20
3	AU915OLD	2	SF8	125 kHz	4/5	1 Km	10 bytes	20
4	AU915OLD	3	SF7	125 kHz	4/5	1 Km	10 bytes	20
5	AU915OLD	4	SF8	500 kHz	4/5	1 Km	10 bytes	20
6	AU915OLD	0	SF10	125 kHz	4/5	2.5 Km	10 bytes	20
7	AU915OLD	1	SF9	125 kHz	4/5	2.5 Km	10 bytes	20
8	AU915OLD	2	SF8	125 kHz	4/5	2.5 Km	10 bytes	20
9	AU915OLD	3	SF7	125 kHz	4/5	2.5 Km	10 bytes	20
10	AU915OLD	4	SF8	500 kHz	4/5	2.5 Km	10 bytes	20
11	AU915OLD	0	SF10	125 kHz	4/5	5 Km	10 bytes	20
12	AU915OLD	1	SF7	125 kHz	4/5	5 Km	10 bytes	20
13	AU915OLD	2	SF8	125 kHz	4/5	5 Km	10 bytes	20
14	AU915OLD	3	SF10	125 kHz	4/5	5 Km	10 bytes	20
15	AU915OLD	4	SF7	500 kHz	4/5	5 Km	10 bytes	20
16	AU915OLD	0	SF8	125 kHz	4/5	7.5 Km	10 bytes	20
17	AU915OLD	1	SF10	125 kHz	4/5	7.5 Km	10 bytes	20
18	AU915OLD	2	SF7	125 kHz	4/5	7.5 Km	10 bytes	20
19	AU915OLD	3	SF8	125 kHz	4/5	7.5 Km	10 bytes	20
20	AU915OLD	4	SF8	500 kHz	4/5	7.5 Km	10 bytes	20

Tabela 2. Detalhes dos *setups* de teste.

4.2. Resultados

Os testes foram realizados durante os dias 11 e 13 de janeiro de 2022, sem adversidades, em dias ensolarados e de clima estável. Os dados obtidos através do sistema TTN Mapper (arquivos CSV) apresentaram resultados satisfatórios e estão disponíveis em https://github.com/RubensRezende/LoRa_Recived_data_TCC. Ademais, o sistema TTN Mapper gerou um mapa de calor (Figura 14).

O site TTN Mapper utiliza cores (detalhadas na subseção 2.5.1) para indicar a qualidade do sinal (mensurado em RSSI) das mensagens recebidas. É possível observar que o ponto de amostragem com distância de 1 Km do *gateway* obteve a cor vermelha, ou seja, uma intensidade de sinal considerada forte. O ponto de amostragem com uma distância de 2,5 Km do *gateway* obteve a cor azul turquesa, o que significa um sinal de mediano para fraco. O ponto de amostragem com uma distância de 5 Km do *gateway* obteve a cor verde, o que significa um sinal mediano. Por fim, o ponto de amostragem com distância de 7,5 Km do *gateway* obteve a cor azul escuro, o que significa um sinal fraco.

Próximo ao ponto de amostragem de 5 Km de distância do *gateway* é possível observar um ponto amarelo e um ponto azul escuro juntamente a um azul. Referem-se à uma bateria de testes descartados devido à forte interferência de fios de alta tensão (torres de transmissão de energia) no local, o que resulta em uma forte interferência eletromagnética na comunicação. Acredita-se que este seja o mesmo motivo pelo qual a média da qua-

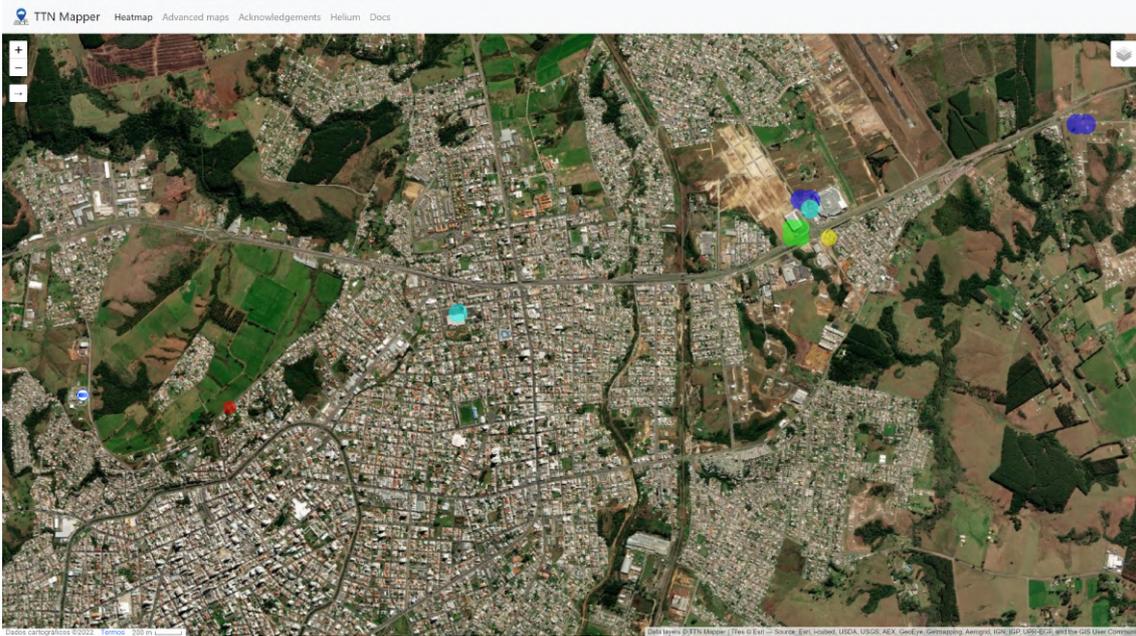


Figura 14. Mapa de calor geral pelo TTN Mapper (TTNMapper 2022).

idade do sinal à uma distância de 2,5 Km tenha se apresentado inferior à qualidade do sinal à uma distância de 5 Km.

Além do mapa de calor, a extração de dados dos arquivos CSV permitiu a análise de três métricas: i) taxa de mensagens enviadas com sucesso, ii) valor médio de SNR, e; iii) valor médio de RSSI.

4.2.1. Taxa de mensagens recebidas com sucesso

A taxa de mensagens recebidas com sucesso é caracterizada pela relação entre o número total de mensagens enviadas pelo *end-node* e o número total de mensagens recebidas com sucesso pelo *gateway*. Esta relação é formalizada pela seguinte equação:

$$MS = \frac{MSG^{RX}}{MSG^{TX}} \times 100 \quad (1)$$

onde MS é a taxa (em percentual) de mensagens recebidas com sucesso, MSG^{RX} é o número total de mensagens recebidas com sucesso e MSG^{TX} é o número total de mensagens enviadas.

O resultado apresentado na Figura 15 demonstra um domínio significativamente maior do DR0 em relação aos demais. No entanto, ao considerarmos o ponto de amostragem com distância de 7,5 Km do *gateway* podemos observar que mesmo o DR0 sofre uma perda de mensagens maior do que 15%, o que é considerado um limite aceitável para muitas aplicações de sensoriamento agrícola. Ao utilizarmos este mesmo parâmetro de referência, podemos observar que o DR4 não se encontra adequado para utilização por quaisquer das distâncias analisadas.

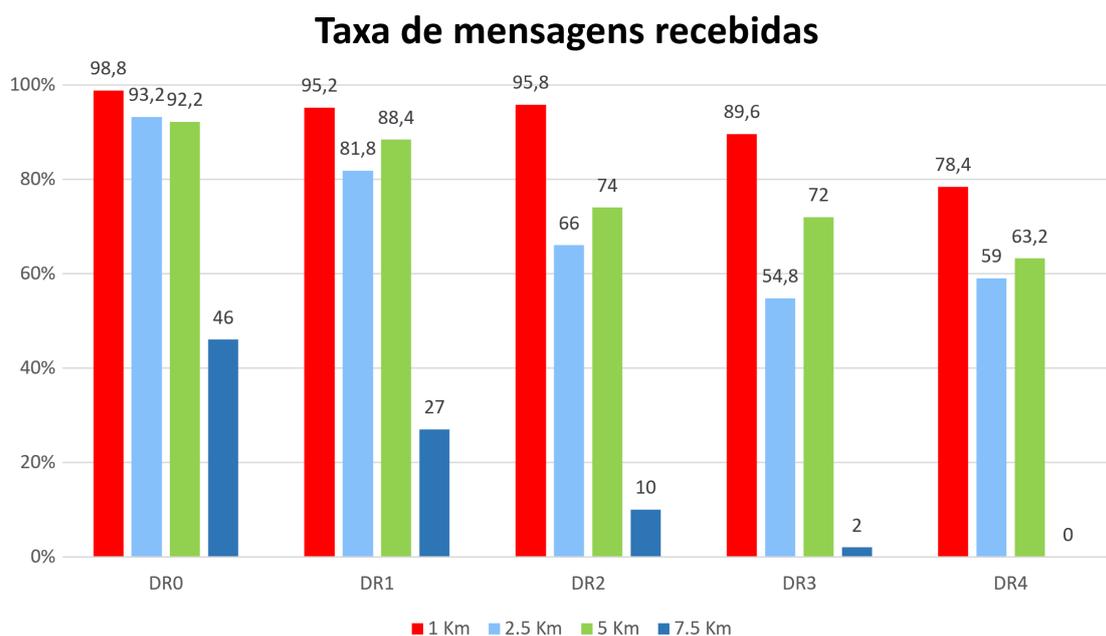


Figura 15. Gráfico da quantia de mensagens recebidas.

Assim como mencionado anteriormente, o resultado apresenta uma anomalia não esperada entre os pontos de amostragem com distâncias de 2,5 Km e 5 Km do *gateway*, respectivamente. Devido a maior distância, era naturalmente esperado que as mensagens enviadas à 2,5 Km de distância alcançassem uma maior taxa de recebimento o que, de acordo com o gráfico, não ocorreu. O ponto de amostragem com distância de 5 Km apresentou melhores taxas de recebimento de mensagens de forma contundente principalmente utilizando-se DR2 e DR3.

Duas hipóteses para explicar esta situação são levantadas. A primeira refere-se à possibilidade de haver algum ponto gerado de interferência eletromagnética próximo ao local de amostragem e que não foi observado na ocasião (similar aos pontos descartados no mapa de calor). A segunda hipótese refere-se ao dia de realização dos testes. Enquanto os testes de 2,5 Km foram realizados no dia 11 de janeiro, os teste de 5 Km foram realizado no dia 13 de janeiro. Neste contexto, algum ruído (outras transmissões na mesma faixa de frequência) poderia estar causando esta anomalia.

Ademais, os testes de 1 Km foram realizado a uma altitude de 935 m, os de 2,5 Km ocorreram na altitude de 890 m, os de 5 Km ocorreram na altitude 920 m e os de 7,5 Km na altitude 946 m. Possuir uma altitude menor é outro fator que pode ajudar a explicar a anomalia obtida. Um local mais baixo esta mais sujeito a interferência por fios de luz e prédios, por exemplo, de forma que um local mais elevado esta acima destes empecilhos para transmissão do sinal, proporcionando uma visada mais limpa até a antena conectada ao *gateway* que se encontra a 930 m acima do nível do mar.

4.2.2. Valor médio do SNR

O *Signal-to-noise ratio* (SNR ou S/N) (Harris e Dick 2012) é um conceito de telecomunicações que faz referência à relação entre o sinal e o ruído. Toda comunicação sem fio por si é um ruído transmitido pelo ar, entretanto existem níveis de aceitação para que um ruído seja inteligível para uma determinada máquina. Caso o nível de ruído esteja fora do limite necessários para a sua demodulação, é possível haver erros na mensagem ou até mesmo a sua perda. Este valor é medido em dB, onde um número elevado significa uma rede com poucos ruídos, em contra partida, um número baixo significa que a rede apresenta uma quantia elevada de ruídos. Durante os testes houveram variação em torno de 10 dBm até -10 dBm, sendo 10 dB um sinal com pouca interferência por ruídos e -10 dB um sinal com alta interferência por ruídos.

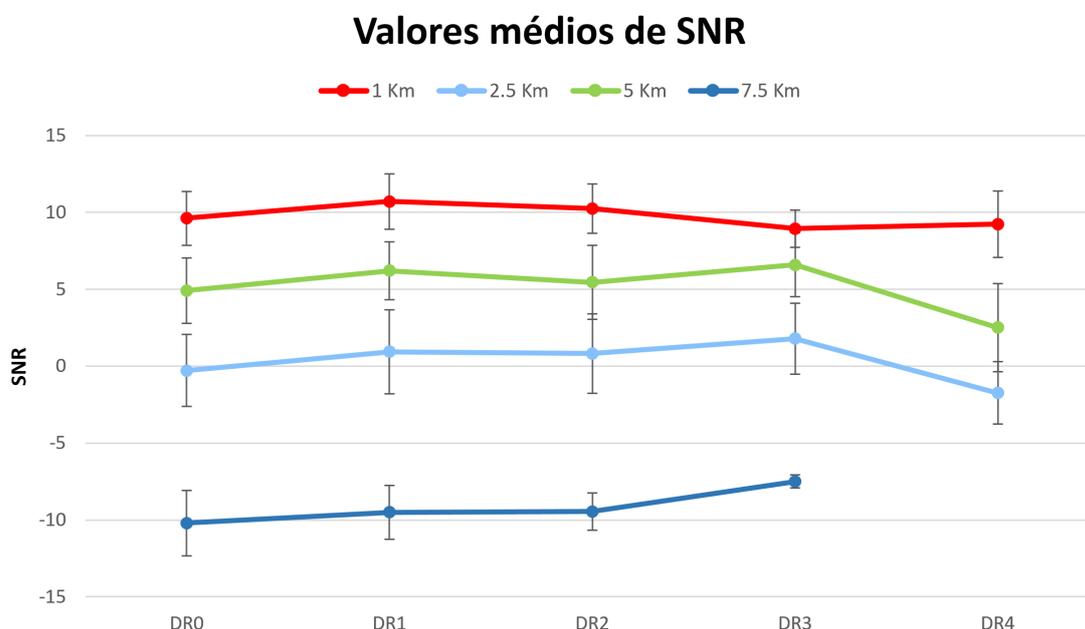


Figura 16. Valores médios de SNR.

A Figura 16 e a Tabela 3 apresentam os resultados obtidos. No gráfico fica nítida a diferença em relação a localização, mostrando-se esta a mais importante em relação a quantia de ruído apresentado nas mensagens. Mais uma vez, ao levarmos em consideração a anomalia entre os Km 2,5 e Km 5, podemos concluir que não é unicamente relevante a distância, mas também o caminho e as adversidades que o sinal sofre entre a emissão no dispositivo *end-node* e o recebimento no *gateway*.

Os DR1, DR2 e DR3 permaneceram estáveis sem alterações significativas nas quatro distâncias. O DR0 apresentou o SNR médio mais baixo dentre os três, sendo o DR1 cerca de 0,5 dBm mais alto que o DR0 e o DR2 cerca de 0,2 dBm mais baixo que o DR1. O DR3 mostrou uma queda de aproximadamente 2 dBm em relação ao DR0 no ponto de amostragem de 1 Km. Porém, em todas as outras distâncias apresentou um ganho significativo, ficando com o posto de maior DR nos demais pontos. O DR4 por sua vez apresentou valores muito inferiores nos pontos de amostragem de 2,5 Km e 5 Km. No ponto de amostragem de 1 Km se manteve estável perante os outros DR de 1 Km,

Setup	Dist.	DR	Média	Desvio Padrão	Mínimo	1 Quartil	Máximo
1	1 Km	0	9.617004	1.751381	2.2	8.5	14.2
2	1 Km	1	10.712815	1.796565	-0.2	10.0	14.0
3	1 Km	2	10.251357	1.614628	1.0	9.8	12.5
4	1 Km	3	8.93817	1.22101	2.5	8.5	10.8
5	1 Km	4	9.238010	2.164208	-10.5	9.2	11.2
6	2,5 Km	0	-0.293018	2.337789	-9.8	-1.5	4.8
7	2,5 Km	1	0.093985	2.742979	-8.8	1.8	5.8
8	2,5 Km	2	0.832500	2.590652	-10.2	-0.8	5.8
9	2,5 Km	3	1.786194	2.318190	-7.8	0.8	6.0
10	2,5 Km	4	-1.738929	2.030013	-13.0	-2.2	1.0
11	5 Km	0	4.914967	2.116481	-4.5	3.8	9.0
12	5 Km	1	6.214091	1.891217	-1.5	5.2	9.8
13	5 Km	2	5.456640	2.403545	-4.5	4.2	9.5
14	5 Km	3	6.591922	2.079513	-5.5	5.8	9.5
15	5 Km	0	2.514239	2.862054	-8.2	1.5	7.8
16	7,5 Km	4	-10.204348	2.126965	-15.0	-11.725	-5.2
17	7,5 Km	1	-9.496296	1.761879	-13.0	-10.65	-6.0
18	7,5 Km	2	-9.45	1.204851	-10.8	10.2	-7.0
19	7,5 Km	3	-7.5	0.424264	-7.8	-7.65	-7.2
20	7,5 Km	4	-	-	-	-	-

Tabela 3. Valores de SNR obtidos.

entretanto, nenhuma mensagens foi recebida na distância de 7,5 Km.

Ao analisar a tabela é visível que o valor mínimo obtido na maioria dos *setups* foi muito abaixo da média, simbolizando que apenas alguns poucos pacotes fugiram muito da média provável do lugar (*outlayers*). A média manteve-se mais próxima do valor máximo, possuindo uma variação de aproximadamente 5 dBm. O *setup* 16, DR0, 7,5 Km apresentou o valor mais baixo de SNR obtido, -15 dBm, mostrando mais um argumento que a distância de 7,5 Km apresentava um caminho difícil de ser percorrido, seguido este pelo *setup* 10, DR4, 2,5 Km com -13 dBm de valor mínimo e 1 dBm de valor máximo, mostrando que mesmo mais próximo do *gateway* apresentou extrema dificuldade em enviar mensagens.

4.2.3. Valor médio do RSSI

O *Received signal strength indication* (RSSI) (Sasiwat et al. 2019) indica a potência do sinal recebido. Por exemplo, um RSSI em uma rede *WiFi* tradicional fica entre -50 dB a 0 dB. Isto é o suficiente para obter qualidade máxima de sinal. Em contra partida, um sinal próximo a -100 dB demonstra uma intensidade mínima de sinal e provavelmente nem seja audível pela interface de comunicação. Durante a realização dos testes o valor de RSSI variou entre aproximadamente -80 dB até -130 dB, como apresentado na Figura 17 e detalhado na Tabela 5.

Analisando os resultados é possível observar que a potência do sinal e a quantidade de ruído estão proporcionalmente conectados. Os testes realizados no ponto de amostragem de 2,5 Km manteve os DR com uma estabilidade significativa, estando todos próximos à média de -110 dB. Os testes realizados no ponto de amostragem de 7,5 Km também

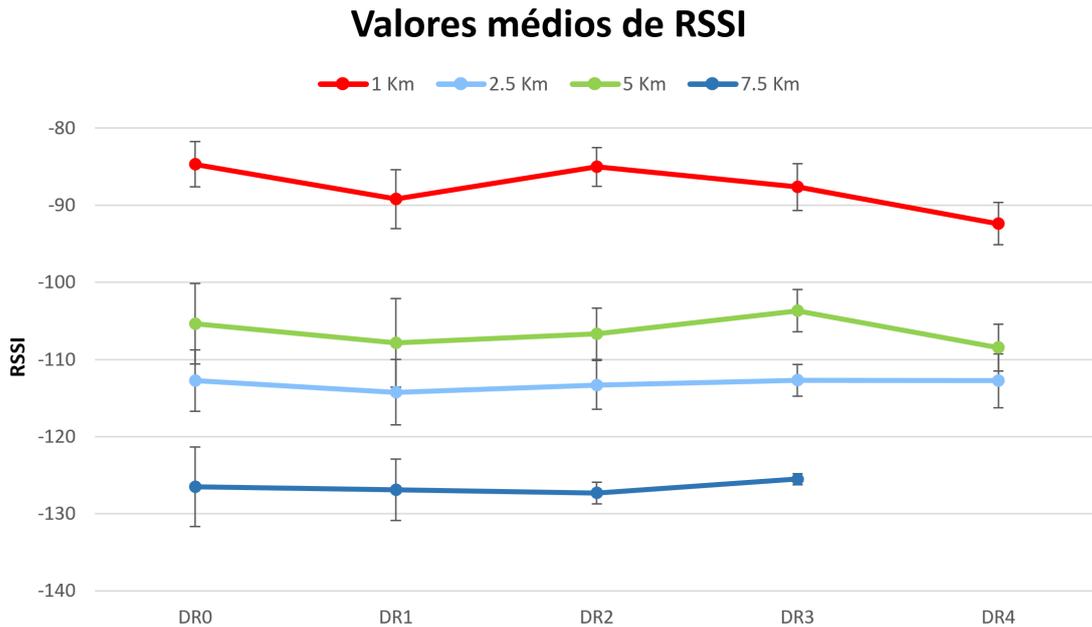


Figura 17. Valores médios de RSSI.

Setup	Gateway dist.	DR	Media	Desvio Padrão	Mínimo	1 Quartil	Máximo
1	1 Km	0	-84.674089	2.942494	-96.0	-87.0	-64.0
2	1 Km	1	-89.197479	3.823318	-99.0	-91.0	-65.0
3	1 Km	2	-84.997912	2.514809	-94.0	-87.0	-72.0
4	1 Km	3	-87.629464	3.039078	-97.0	-90.0	-76.0
5	1 Km	4	-92.369898	2.763187	-106.0	-94.0	-76.0
6	2,5 Km	0	-112.718884	5.221991	-128.0	-115.0	-86.0
7	2,5 Km	1	-114.234719	5.758937	-126.0	-117.0	-82.0
8	2,5 Km	2	-113.303030	3.319692	-128.0	-114.0	-99.0
9	2,5 Km	3	-112.675182	2.741682	-120.0	-114.0	-99.0
10	2,5 Km	4	-112.742373	3.049713	-123.0	-114.0	-84.0
11	5 Km	0	-105.364425	3.977867	-115.0	-108.0	-72.0
12	5 Km	1	-107.828054	4.257295	-117.0	-111.0	-80.0
13	5 Km	2	-106.675676	3.172152	-114.0	-108.0	-83.0
14	5 Km	3	-103.672222	2.062615	-109.0	-105.0	-90.0
15	5 Km	4	-108.433544	3.504919	-117.0	-110.0	-90.0
16	7,5 Km	0	-126.5	5.167204	-133.0	-129.0	-106.0
17	7,5 Km	1	-126.888889	3.983942	-132.0	-129.0	-110.0
18	7,5 Km	2	-127.3	1.418136	-129.0	-128.75	-125.0
19	7,5 Km	3	-125.5	0.707107	-126.0	-125.75	-125.0
20	7,5 Km	4	-	-	-	-	-

Tabela 4. Valores de RSSI obtidos.

mantiveram valores estáveis mantendo-se todos próximos da média de -126 dB. Os testes realizados nos pontos de amostragem de 1 Km e 5 Km, por outro lado, tiveram maiores variações de RSSI médio, apresentando o DR0 com maior valor e o DR4 como menor, salvo o DR0 1 Km que obteve a maior queda de valor médio demonstrando em um *setup*. Queda possivelmente causada pelo valor de *bandwidth* mais elevado que culminou negativamente com a qualidade do sinal obtido.

Após analisar o gráfico de RSSI médio fica evidente que a anormalidade citada na seção 4.2.1 esta de acordo com o comportamento esperado, logo, não se trata de uma anormalidade perante a qualidade de sinal. Os valores de RSSI indicam a potencia do sinal, por conta disto, a informação disposta no gráfico indica que o Km 1 obteve o sinal com maior potencia se guido em ordem pelos Km 5, Km 2,5 e Km 7,5, portanto, o comportamento esperado é que os locais que apresentam maior RSSI igualmente apresentem a maior taxa de mensagens recebidas. Promovendo assim coerência com o gráfico disposto na imagem 15, em que os Km 1 e 5 possuem melhores resultados.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este estudo teve como objetivo principal realizar uma gama de testes experimentais utilizando diferentes configurações da tecnologia LoRa/LoRaWAN a fim de discutir quais configurações são eficientes com foco no uso desta tecnologia para soluções de agricultura de precisão ou semelhantes. Os resultados foram apresentados no formato de gráficos, tabelas e um mapa de calor, além das suas respectivas discussões. O objetivo macro foi concluído com sucesso uma vez que os resultados obtidos são coerentes entre si e com a especificação LoRaWAN, possibilitando gerar um embasamento para um ganho de informação.

Ao considerarmos a taxa de transmissão de mensagens com sucesso e, assumindo o pressuposto que um limite tolerável de perda é de 15% dos dados enviados, podemos concluir que:

- no ponto de amostragem de 1 Km, praticamente todos os DR (com exceção do DR4) possuem uma taxa de eficiência aceitável, com ênfase ao DR0, que demonstrou os melhores resultados;
- no ponto de amostragem de 2,5 Km, valores aceitáveis foram encontrados apenas utilizando-se o DR0, porém, o DR1 se aproximou muito do parâmetro estabelecido possivelmente não o atingindo perante a anormalidade citada na seção 4;
- no ponto de amostragem de 5 Km, os valores aceitáveis foram encontrados utilizando-se o DR0 e o DR1, os demais não se aproximaram da meta estabelecida;
- no ponto de amostragem de 7,5 Km, nenhuma configuração de DR atingiu resultados minimamente satisfatórios, o que, de acordo com a especificação da tecnologia, é coerente, visto que, em perímetro urbano a tecnologia oferece cobertura de qualidade até 5 Km;

Desta forma, podemos construir a seguinte tabela de adequabilidade¹⁷:

Os valores de RSSI e SNR dispostos nas Figuras 17 e 16, respectivamente, permitem a constatação do ruído e adversidades que as mensagens transpuseram no percurso do dispositivo *end-node* até o *gateway*. A partir dos mesmo é possível concluir que apesar da distância maior, as mensagens enviadas na faixa de 5 Km apresentaram menos dificuldade no percurso que as mensagens enviadas na faixa de 2,5 Km. Concluimos portanto que, um caminho limpo (visada direta da antena) e sem grandes adversidades, tais como fios de alta tensão, é fundamental para um melhor aproveitamento da tecnologia. Apesar

¹⁷Salientando que há a possibilidade de ajuste no ponto de amostragem de 2,5 Km em função da anomalia discutida anteriormente.

Distância	DR	Status
1 Km	0	Sim
1 Km	1	Sim
1 Km	2	Sim
1 Km	3	Sim
1 Km	4	Não
2,5 Km	0	Sim
2,5 Km	1	Não
2,5 Km	2	Não
2,5 Km	3	Não
2,5 Km	4	Não
5 Km	0	Sim
5 Km	1	Sim
5 Km	2	Não
5 Km	3	Não
5 Km	4	Não
7,5 Km	0	Não
7,5 Km	1	Não
7,5 Km	2	Não
7,5 Km	3	Não
7,5 Km	4	Não

Tabela 5. Tabela de adequabilidade.

de operar em baixa frequência, 915 MHz até 928 MHz, não foi possível ignorar as adversidades de um perímetro urbano por completo. Portanto, é recomendado que a antena do dispositivo esteja à uma distância considerável de adversidades e que possua uma rota limpa até a antena receptora, prezando que ambas as antenas estejam a uma altura ou distância que permita a comunicação.

Devido os testes terem sido realizados em área urbana, por limitação de infraestrutura, acredita-se que se os mesmos fossem realizados em uma área rural, sem edificações ou fios de alta tensão os resultados seriam significativamente melhores. Logo, baseado nos dados obtidos, é possível garantir que os DR 0 e 1 seriam suficientemente adequados para soluções de agricultura de precisão em até 5 Km de distância entre *end-node* e *gateway*. Os demais DR provavelmente funcionariam de forma muito mais eficiente em distâncias de até 5 Km, porém, isto só poderia ser afirmado mediante mais testes. A distância de 7,5 Km não mostrou resultados satisfatórios em nenhum DR, todavia acredita-se que em área rural os resultados, principalmente dos DR 0 e 1, seriam capazes de cobrir a área de 7,5 Km.

Como trabalhos futuros, podemos sugerir a melhoria do *setup* de testes, aumentando o número de amostras e de pontos de amostragem, de mesma forma que comparando os testes realizados em área urbana e rural. Isto tornaria o trabalho mais robusto e garantiria uma confiança maior nos dados obtidos. Mesmo que os testes tenham se mostrado promissores e coesos à tecnologia, aumentar as amostras e os pontos de amostragem pode ser benéfico para uma maior abrangência das possibilidades que pode ocorrer durante a transmissão das mensagens.

Ademais, sugere-se também explorar mais variáveis relacionadas ao comportamento das mensagens e configurações dos dispositivos LoRa/LoRaWAN. A utilização da

variável *air time*, que calcula quanto tempo o pacote demorou para chegar do remetente até o destinatário pode gerar ganhos de conhecimento que, juntamente a testes com diferentes tamanhos de *payload* agregariam no conhecimento da tecnologia. Desta forma, uma análise comparativa em função do *air time*, que pode aumentar em função do aumento do *payload* e/ou diminuição do DR, resultaria em conclusões mais precisas.

Referências

- [Abed e Abd-aljabar 2020] Abed, J. e Abd-aljabar, H. (2020). Smart monitor of pacemaker patient by using iot cloud in real time. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18:158.
- [Alliance 2021] Alliance, T. L. (2021). What are lora® and lorawan®? Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>. Acesso em 23 ago. 2021.
- [Atzori et al. 2010] Atzori, L., Iera, A., e Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, pages 2787–2805.
- [Bandara et al. 2020] Bandara, T. M., Mudiyanse, W., e Raza, M. (2020). Smart farm and monitoring system for measuring the environmental condition using wireless sensor network - IoT Technology in farming. In *2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA)*, pages 1–7.
- [Bor et al. 2016] Bor, M., Vidler, J., e Roedig, U. (2016). Lora for the internet of things. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, page 361–366, USA. Junction Publishing.
- [Cerná, Marie e Vallisová, Lucie 2021] Cerná, Marie e Vallisová, Lucie (2021). IoT - Tool of Society 4.0 - Literary Review. *SHS Web Conf.*, 91:01033.
- [Chaudhary et al. 2019] Chaudhary, S., Johari, R., Bhatia, R., Gupta, K., e Bhatnagar, A. (2019). Craiot: Concept, review and application(s) of iot. In *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, pages 1–4.
- [Choi et al. 2020] Choi, J., Lim, D., Choi, S., Kim, J., e Kim, J. (2020). Light control smart farm monitoring system with reflector control. In *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pages 69–74.
- [Di Renzone et al. 2021] Di Renzone, G., Parrino, S., Peruzzi, G., e Pozzebon, A. (2021). Lorawan in motion: Preliminary tests for real time low power data gathering from vehicles. In *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (Metro-Automotive)*, pages 232–236.
- [Dlamini e Johnston 2016] Dlamini, N. N. e Johnston, K. (2016). The use, benefits and challenges of using the Internet of Things (IoT) in retail businesses: A literature review. In *2016 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE)*, pages 430–436.
- [Farooq et al. 2019] Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., e Naeem, M. A. (2019). A survey on the role of iot in agriculture for the implementation of smart farming. *IEEE Access*, 7:156237–156271.
- [Fortin et al. 2009] Fortin, M. F., Côté, J., e Fillion, F. (2009). *Fundamentos e Etapas do Processo de Investigação*. Lusodidacta.
- [Gislam 2021] Gislam, S. (2021). Industry 4.0 - fourth time's the charm? Disponível em: <https://industryeurope.com/sectors/technology-innovation/industry-4-0-fourth-times-the-charm/>. Acesso em 09 fev. 2022.
- [Google 2022] Google (2022). Paradas teste lora. Disponível em: https://www.google.com/maps/d/edit?mid=12o1ETplxja_9sv87FHULv8XaT95w0j7L&usp=sharing. Acesso em 09 fev. 2022.
- [Harris e Dick 2012] Harris, F. e Dick, C. (2012). Snr estimation techniques for low

- snr signals. In *The 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, pages 276–280.
- [Islam et al. 2018a] Islam, A., Akter, K., Nipu, N. J., Das, A., Mahbubur Rahman, M., e Rahman, M. (2018a). Iot based power efficient agro field monitoring and irrigation control system : An empirical implementation in precision agriculture. In *2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, pages 372–377.
- [Islam et al. 2018b] Islam, A., Akter, K., Nipu, N. J., Das, A., Mahbubur Rahman, M., e Rahman, M. (2018b). Iot based power efficient agro field monitoring and irrigation control system : An empirical implementation in precision agriculture. In *2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, pages 372–377.
- [Islam et al. 2020] Islam, N., Ray, B., e Pasandideh, F. (2020). Iot based smart farming: Are the lpwan technologies suitable for remote communication? In *2020 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, pages 270–276.
- [Koompaiojn et al. 2017] Koompaiojn, S., Puitrakul, C., Bangkok, T., Riyagoon, N., e Ruengittinun, S. (2017). Smart tag tracking for livestock farming. In *2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media)*, pages 1–4.
- [Lavric et al. 2019] Lavric, A., Petrariu, A. I., e Popa, V. (2019). Sigfox communication protocol: The new era of iot? In *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*, pages 1–4.
- [Lee et al. 2019] Lee, S., Ahn, H., Seo, J., Chung, Y., Park, D., e Pan, S. (2019). Practical monitoring of underground pigs for iot-based large-scale smart farm. *IEEE Access*, 7:173796–173810.
- [Li et al. 2017] Li, L., Ren, J., e Zhu, Q. (2017). On the application of lora lpwan technology in sailing monitoring system. In *2017 13th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, pages 77–80.
- [Liya e Arjun 2020] Liya, M. e Arjun, D. (2020). A survey of lpwan technology in agricultural field. In *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, pages 313–317.
- [LLC 2015] LLC, P. M. G. (2015). Brazil – slow internet connections, particularly in rural areas, hamper effective web use at schools in brazil. *Professional Media Group LLC*, 51(12). [Accessed 21/Jun/2021].
- [Mushtaq et al. 2020] Mushtaq, A., Gupta, S. H., e Rajawat, A. (2020). Design and performance analysis of lora lpwan antenna for iot applications. In *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pages 1153–1156.
- [Muteba et al. 2019] Muteba, F., Djouani, K., e Olwal, T. (2019). A comparative survey study on lpwa iot technologies: Design, considerations, challenges and solutions. *Procedia Computer Science*, 155:636–641. The 16th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2019), The 14th International Conference on Future Networks and Communications (FNC-2019), The 9th International Conference on Sustainable Energy Information Technology.
- [Naik 2018] Naik, N. (2018). Lpwan technologies for iot systems: Choice between ultra narrow band and spread spectrum. In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, pages 1–8.

- [Petrariu et al. 2019] Petrariu, A. I., Lavric, A., e Coca, E. (2019). Lorawan gateway: Design, implementation and testing in real environment. In *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, pages 49–53.
- [Rachkidy et al. 2018] Rachkidy, N. E., Guitton, A., e Kaneko, M. (2018). Decoding superposed lora signals. In *2018 IEEE 43rd Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 184–190.
- [Rahman e Suryanegara 2017] Rahman, A. e Suryanegara, M. (2017). The development of IoT LoRa: A performance evaluation on LoS and Non-LoS environment at 915 MHz ISM frequency. In *2017 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, pages 163–167.
- [Rossato et al. 2020] Rossato, J., Spanhol, F., e Camargo, E. (2020). Implantação e avaliação de uma rede sem-fio de longo alcance e baixa potência para cidades inteligentes. In *Anais do IV Workshop de Computação Urbana*, pages 192–205, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- [Saifullah et al. 2018] Saifullah, A., Rahman, M., Ismail, D., Lu, C., Liu, J., e Chandra, R. (2018). Low-power wide-area network over white spaces. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 26(4):1893–1906.
- [Sakurai e Zuchi 2018] Sakurai, R. e Zuchi, J. D. (2018). As revoluções industriais até a indústria 4.0. *Revista Interface Tecnológica*, 15(2):480–491.
- [Sasiwat et al. 2019] Sasiwat, Y., Jindapetch, N., Buranapanichkit, D., e Booranawong, A. (2019). An experimental study of human movement effects on rssi levels in an indoor wireless network. In *2019 12th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, pages 1–5.
- [Silva 2022] Silva, J. (2022). Fieam fala de indústria 4.0 em live no dia 15. Disponível em: <https://cristinamonte.com.br/fieam-fala-de-industria-4-0-em-live-no-dia-15/>, Acesso em 10 fev. 2022.
- [Steelbras 2022] Steelbras (2022). Antena ap10249. Disponível em: <https://www.steelbras.com.br/produto/antena-base-uhf-colinear-6db-com-radiais-900a960-mhz/>. Acesso em 06 fev. 2022.
- [Store 2022] Store, L. (2022). Dragino lps8. Disponível em: <https://www.elektor.com/dragino-lps8-indoor-lorawan-gateway-868-mhz>. Acesso em 06 fev. 2022.
- [Teleco 2021] Teleco, I. e. C. (2021). Wlan x sistemas móveis celulares: Faixas de frequências. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwlanx/pagina_3.asp. Acesso em 23 ago. 2021.
- [TTNMapper 2022] TTNMapper (2022). Heatmap. Disponível em: <https://ttnmapper.org/heatmap/>. Acesso em 06 fev. 2022.
- [Yu 2022] Yu, Z. (2022). Iot logo. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/55872851609868513/>, Acesso em: 10 fev. 2022.
- [Zourmand et al. 2019] Zourmand, A., Kun Hing, A. L., Wai Hung, C., e AbdulRehman, M. (2019). Internet of Things (IoT) using LoRa technology. In *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, pages 324–330.