

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Elétrica

Junior Matté

Aplicação da Modulação LoRa ao Monitoramento
Geotécnico

Porto Alegre

2022

Junior Matté

Aplicação da Modulação LoRa ao Monitoramento Geotécnico

Application of LoRa Modulation to Geotechnical Monitoring

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador Prof. Dr. Ivan Müller

Porto Alegre
2022

Junior Matté

Aplicação da Modulação LoRa ao Monitoramento Geotécnico

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica.

Porto Alegre, 07 de março de 2022

Prof. Dr. Ivan Müller

UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Giovani Bulla

UFRGS

Prof. Dr. Felipe Gobbi Silveira

UNISINOS

Porto Alegre
2022

“All effective innovations are breathtakingly simple. Indeed, the greatest praise an innovation can receive is for people to say: ‘This is obvious. Why didn’t I think of it?’ ”

Peter F. Drucker

RESUMO

Os sistemas de comunicação modernos estão cada vez mais robustos e eficientes, sendo aplicados em muitos segmentos relacionados a existência humana e seu redor. A modulação LoRa e seu protocolo LoraWan somados aos conceitos de IoT, compõem soluções completas para monitoramentos com necessidade de comunicações de longo alcance, robustas e baratas, enquanto mantém baixo consumo energético. A utilização dessas tecnologias e outros componentes eletrônicos, como o RTC e o leitor de cartão micro SD, juntamente de conhecimentos sobre antenas e propagação de ondas eletromagnéticas, na construção de rádios transceptores voltados às aplicações de monitoramento geotécnico são capazes de reduzir custos, aumentar o escopo de projetos, aumentar a segurança dos profissionais envolvidos e possibilitar o monitoramento de áreas sem sinal de Internet e de difícil e perigoso acesso. O emprego desses rádios em dois testes representativos do âmbito geotécnico, tendo um ocorrido em área rural e outro em área urbana, obteve resultados consideráveis, corroborando com os estudos feitos sobre as características e as capacidades da modulação LoRa.

Palavras-chave: Modulação LoRa, Monitoramento, Geotecnia, IoT.

ABSTRACT

Modern communication systems are increasingly robust and efficient, being applied in many segments related to human existence and its surroundings. LoRa modulation and its LoraWan protocol added to the IoT concepts, make up complete solutions for mobile monitoring with the need for long-range, robust and inexpensive communications, while maintaining low energy consumption. The use of these technologies and other electronic devices such as the RTC and the micro SD card adapter, along with knowledge of antennas and propagation of electromagnetic waves, in the construction of radio transceivers aimed to geotechnical monitoring applications are able to reduce costs, increase the scope of projects, increase the safety of the professionals involved and make it possible to monitor areas with no Internet signal and difficult and dangerous access. The use of these radios in two representative tests of the geotechnical scope, with one occurring in a rural area and another in an urban area, obtained considerable results, corroborating the studies about the characteristics and the capabilities of LoRa modulation.

Keywords: LoRa Modulation, Monitoring, Geotechnics, IoT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração do conceito IoT.	16
Figura 2 – Ilustração geral da arquitetura IoT enfatizando os mercados verticais e horizontais e a integração entre eles.	18
Figura 3 – Modelo de Sete Camadas OSI.	20
Figura 4 – Exemplo de <i>Frequency-Hopping</i>	21
Figura 5 – Espectro de sinal de <i>Up-Chirp</i> e <i>Down-Chirp</i> , à esquerda e à direita, respectivamente.	22
Figura 6 – Características da Modulação LoRa.	23
Figura 7 – Hierarquia para uma aplicação baseada na modulação LoRa	24
Figura 8 – Arquitetura típica de uma rede LoRaWAN.	26
Figura 9 – Zona de Fresnel.	28
Figura 10 – Registrador de Dados Fieldlogger Novus.	31
Figura 11 – Estação de monitoramento Hobo RX3000.	32
Figura 12 – Rádios Transceptores montados em placas de prototipação.	35
Figura 13 – Rádio Transceptor LoRa RFM95W.	36
Figura 14 – Antena Monopolo OEM 5.1dBi 915Mhz PCB, marca C-3PO Tecnologia.	36
Figura 15 – Diagrama de radiação de campo distante.	37
Figura 16 – Módulo RTC DS3231.	37
Figura 17 – Módulo adaptador de cartão de memória.	38
Figura 18 – Módulo Microcontrolador DOIT ESP32-Wroom 32u e antena <i>Wifi</i> 2.4 GHz.	39
Figura 19 – Sensor de Temperatura DHT11.	39
Figura 20 – Exemplo de pacotes de dados utilizados nos testes.	41
Figura 21 – Imagem de satélite do local do Teste em Área Rural.	42
Figura 22 – Gráfico de características topográficas do local do Teste em Área Rural.	42
Figura 23 – Gráficos de temperatura e umidade gerados pelos dados salvos localmente durante teste em área rural.	43
Figura 24 – Gráficos de temperatura e umidade gerados pelos dados dependentes da comunicação LoRa durante teste em área rural.	44
Figura 25 – Imagem de satélite do local do Teste em Área Urbana.	45
Figura 26 – Gráfico de características topográficas do local do Teste em Área Rural.	45
Figura 27 – Página <i>web</i> contendo gráficos de temperatura e umidade gerados sincronamente ao teste em área urbana.	46
Figura 28 – Gráfico de Temperatura gerado com dados salvos localmente, posteriormente ao teste.	47

Figura 29 – Gráfico de Umidade gerado com dados salvos localmente, posteriormente ao teste. 47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>
km	quilômetros
LoRa	<i>Long Range</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
m	metros
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
RF	<i>Radiofrequency</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Internet das Coisas	15
2.2	Redes de Ampla Cobertura e Baixa Potência	18
2.3	LoRa e LoRaWan	19
2.4	A Modulação LoRa	21
2.5	O Protocolo LoraWan	24
2.5.1	A arquitetura de uma rede LoRaWAN	24
2.5.2	Classes de Dispositivos LoRaWAN	25
2.5.3	LoRa Alliance	26
2.6	Antenas e Propagação	27
2.7	Engenharia Geotécnica	29
2.7.1	Instrumentação e Monitoramento Geotécnico	29
2.8	Produtos e Trabalhos Relacionados	30
2.8.1	Fieldlogger Novus	30
2.8.2	Hobo RX3000	31
2.8.3	Trabalhos Relacionados	32
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	35
3.1	Construção dos Rádios Transceptores	35
3.2	Testes Realizados	40
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

De uma forma geral, pesquisas e desenvolvimentos em tecnologias de comunicação visam proporcionar facilidades e melhorias às mais diversas áreas relacionadas ao bem-estar do ser humano e de seu redor. Saúde, educação, segurança, sustentabilidade, quaisquer que sejam os assuntos relacionados a existência humana podem ter seus métodos e maneiras enriquecidos por soluções e avanços em meios de comunicação. Através do desenvolvimento de *hardwares* de radiofrequência em miniatura, mais baratos e altamente confiáveis nos anos de 1970, nasceu a era das comunicações sem fio. Segundo Rappaport (2009), o recente crescimento exponencial nos sistemas de rádio-celular pode ser atribuído diretamente ao amadurecimento das tecnologias criadas na década de setenta.

No mundo moderno, é difícil encontrar um indivíduo ou meio que não tenha sido influenciado pelas novas tecnologias de comunicação. Antes dos tempos modernos, mensagens eram transportadas por corretores, pombos-correio, luzes e fogo. Estes esquemas eram adequados às distâncias e às “taxas de dados” da época. Na maior parte do mundo, esses modos de comunicação foram substituídos por sistemas elétricos de comunicação, capazes de transmitir sinais por distâncias muito maiores e à velocidade da luz. A comunicação elétrica, além de confiável e econômica, tem a capacidade de aumentar a produtividade e a conservação de energia, (LATHI; DING, 2012).

A Internet, criada em 1969 com o propósito de interligar laboratórios de pesquisa dos EUA durante a Guerra Fria, tornou-se umas das principais e mais comuns maneiras de troca de informações e dados atualmente, sendo vista como fundamental em muitas áreas. Vemos a constante busca por formas de interligar qualquer que seja o elemento à Internet ou, basicamente, de transformar todo possível objeto ou meio em uma forma digital e acessível de qualquer lugar que possua acesso à rede. Com este propósito surge o conceito IoT, do inglês *Internet of Things*, tratando-se da inclusão de objetos quaisquer à Internet, com a capacidade de trocarem informações entre si e atuarem em situações necessárias. As aplicações já existentes estão presentes em inúmeras áreas, desde domésticas como geladeiras e sistemas de condicionamento de ar, até ambientes industriais, hospitalares, acadêmicos e militares, por exemplo.

Neste contexto, o presente documento visa explorar, além da aplicação do conceito IoT, o esquema de modulação de radiofrequência conhecido por LoRa. LoRa é uma especificação de camada física de comunicação sem fio, propriedade da empresa Semtech, porém permitida sua utilização e desenvolvimento por outras marcas. Ela é utilizada no protocolo de comunicação LoRaWan, majoritariamente, e usa técnica de modulação de espalhamento espectral do tipo *chirp*. O protocolo de comunicação LoRaWAN é aberto, se utiliza do espectro de radio frequência não licenciado ISM, do inglês *Industrial, Scientific, and Medical* (Industrial, Científico e Medicinal), e estabelece uma solução que visa o baixo consumo de energia para a transmissão de pequenos pacotes de dados por longas distâncias, enquadrando-se na classe LPWAN, do inglês

Low Power Wide Area Network.

A Engenharia Geotécnica é a subdisciplina da engenharia civil que envolve e estuda materiais naturais encontrados próximos à superfície da Terra. Esta ciência busca avaliar e garantir a estabilidade e segurança de estruturas que dependem do comportamento dos solos e rochas, utilizando-se das aplicações dos princípios de mecânica destes a projetos de fundações, estruturas de contenção e estruturas geotécnicas, (DAS, 2006).

Dificilmente se encontra uma pessoa incapaz de citar algum caso de que tenha tido conhecimento em relação a algum deslizamento de encostas, algum colapso de um prédio ou estrutura, ou alguma interdição de áreas de moradias pelo estado do local. São muitos os exemplos que podem ser citados que possuem ligação direta com a ciência de que trata a geotecnia. No Brasil, tivemos dois exemplos recentes de desastres ocorridos devido a ausência de um bom estudo e possível monitoramento geotécnico dos locais (claro, somados a outros fatores). O primeiro, ligado a mineração, foi o rompimento da barragem de Brumadinho, em Minas Gerais, em janeiro de 2019, causando centenas de fatalidades, além de complicações ambientais à região. E o segundo ocorreu no dia 8 de janeiro de 2022, quando um enorme bloco rochoso desabou sobre turistas, também em Minas Gerais, em uma área conhecida como Capitólio.

A empresa FGS Geotecnia Ambiental, fundada no ano de 2006, é especializada no desenvolvimento de projetos e estudos geotécnicos. Seus trabalhos envolvem mineradoras, empresas de energia, rodovias, ferrovias e construção civil. A FGS se utiliza de técnicas de instrumentação e monitoramento geotécnico em alguns de seus projetos e estudos como forma de averiguar o estado e o desenvolvimento de suas demandas. A aplicação dessas técnicas se fazem presentes nas fases de planejamento, fase de execução das ações devidas, posteriores às suas realizações ou diante de quaisquer eventos extraordinários, (VIEIRA, 2017). Dessa forma, é possível proporcionar ainda maior segurança às atividades, além da possibilidade de engrandecer os conhecimentos envolvidos na área através da análise de dados provenientes dos instrumentos aplicados.

Devido a área de atuação, uma grande parte das atividades da empresa são realizadas em locais que podem expor seus profissionais à situações perigosas, áreas de possíveis instabilidades ou de muito difícil acesso. Mesmo possuindo um corpo de integrantes devidamente treinados, certificados e corretamente equipados para essas atividades, é necessário o constante gerenciamento burocrático relacionado a adequação para a realização de seus serviços. Atualmente, a empresa se utiliza de leituras manuais de instrumentos ou do emprego de registradores de dados locais. Ambos os métodos, apesar de funcionais, possuem algumas dificuldades e complicações. Para o caso das leituras manuais, desde a fase administrativa necessária envolvida, até a própria execução dos serviços pelos profissionais em campo - que terão que enfrentar todas as possíveis barreiras para ter acesso aos sensores, diariamente - há complexidades à serem resolvidas. Quanto à utilização dos registradores de dados locais, comumente aplicados aos projetos que necessitam de um número maior de leituras diário, precisa-se de muita atenção para o dimensionamento do sistema, pois é comum se encontrar distâncias superiores a 100

m entre sensores e aparelhos registradores que, na grande maioria das vezes, é percorrida por cabos, dependendo da tecnologia dos sensores empregados. Isso, além de possibilitar erros de leituras e de suas interpretações, acaba expondo o sistema às atividades humanas, relacionadas ou não às obras dos projetos, e também naturais, como a presença de animais, deslizamentos nos locais instáveis e interpéries.

Neste âmbito, a introdução de tecnologias de comunicação modernas às atividades da empresa representa uma forma de facilitar o enredo de um serviço de monitoramento, tanto para planejamento, quanto para sua execução, e possibilita enriquecer as propostas de seus serviços. Através da aplicação dos conceitos de IoT, da modulação LoRa e seu protocolo LoRaWan, foram prototipados dois rádios transceptores para a realização de dois testes representativos à geotecnia. Dois locais foram selecionados e estudados, onde além dos conceitos anteriores, foram aplicadas teorias de antenas e propagação para a adequada utilização aos mesmos. A teoria de antenas estabelece parâmetros para a escolha dos corretos elementos irradiantes e a ferramenta de estudo de propagação chamada de Zona de Fresnel, atua como suporte para a correta instalação e posicionamento dos transmissores e receptores de forma a averiguar possíveis fontes de interferência à comunicação. Com isso, se espera obter embasamento para o desenvolvimento de aparelhos de monitoramento mais versáteis e de menores custos às aplicações geotécnicas em comparação com outros já existentes.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, incluída a descrição de tecnologias comercializadas já utilizadas pela empresa e de trabalhos semelhantes. No capítulo 3 são mostrados os métodos e materiais aplicados aos testes, assim como os resultados obtidos e, por fim, no capítulo 4 estão as conclusões e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas as fundamentações teóricas utilizadas como base para o desenvolvimento deste trabalho, se iniciando pelo conceito de IoT, seguido da modulação LoRa e seu protocolo LoRaWan, a ciência alvo para sua aplicação (Engenharia Geotécnica), uma breve revisão sobre teoria de antenas e propagação e, por fim, a descrição de produtos já existentes no mercado e de trabalhos similares.

2.1 INTERNET DAS COISAS

A Internet das Coisas, ou IoT, pode ser interpretada como a interligação entre quaisquer objetos de nosso cotidiano à Internet, estes denominados de Objetos Inteligentes. Por exemplo, se algum dispositivo que utilizamos em nossas casas, qualquer seja sua serventia, tiver a capacidade de se conectar à Internet, este pode ser considerado um Dispositivo Inteligente no âmbito da Internet das Coisas. Em 1999, Kevin Ashton, um pesquisador britânico do MIT, pioneiramente propôs o termo “The Internet of Things” de forma a rotular o ato de conexão do mundo físico à Internet através de sensores onipresentes. Propôs seu conceito inicial como a conexão de objetos únicos de identificação singular, através de tecnologia de rádio frequência (RFID). No entanto, a definição de IOT ainda está em processo de formação, sendo embasada de acordo com o desenvolvimento e ciência de suas novas aplicações, Bhat, Gokhale e Bhat (2007).

Para Madakam, Ramaswamy e Tripathi (2015), não há uma única definição para o termo, porém, a melhor definição seria: “Uma rede aberta e abrangente de objetos inteligentes que possuem a capacidade de se auto-organizar, compartilhar informações, dados e recursos, reagindo e agindo diante de situações e mudanças no ambiente”. A Figura 1 ilustra o conceito básico da aplicação da Internet das Coisas como descrito.

Segundo Al-Sarawi et al. (2017), o ambiente IoT consiste em um enorme número de dispositivos inteligentes, mas com muitas complexidades a serem enfrentadas. A capacidade de processamento, o volume de armazenamento, o consumo energético, o alcance do sinal de rádio, estão entre esses desafios. Portanto, a implementação da IoT requer protocolos de comunicação que possam gerenciar com eficiência essas condições. O desenvolvimento de protocolos visando, cada vez mais, aplicações específicas é muito comum neste âmbito. Por exemplo, para o sensoriamento remoto em áreas rurais, normalmente se necessita de um equipamento munido de um protocolo que vise a preservação da vida útil de sua bateria e um longo e íntegro alcance para o sinal, enquanto para uma aplicação em território urbano, para o monitoramento de máquinas em uma empresa, é necessário dar uma atenção maior a interação de possíveis interferências diante de outras tecnologias ou mesmo da grande quantidade de aplicações próximas utilizando-se do mesmo protocolo.

Existe um número grande de tecnologias e soluções desenvolvidas presentes em nosso

inteligentes, atuadores e dispositivos móveis. Sua aplicação é comum na indústria para o controle e monitoramento de máquinas e processos;

- V2V (conhecida como Comunicação Veicular Par- a- Par, do inglês *Vehicle-to-Vehicle Communication*): as comunicações V2V consistem na troca de informações entre veículos que atuam como nós em uma rede conhecida como *Ad-Hoc*, e a comunicação é feita pelo uso de vários sensores conectados a esta. A infra-estrutura desta rede é bastante complicada porque não há nenhuma topologia fixa a ser seguida, pois os veículos estão movendo-se de um lugar para outro constantemente. Existem quatro categorias mais amplas desta rede que, basicamente, definem seus propósitos. São elas: segurança e prevenção de colisões; gerenciamento de infraestrutura de tráfego; telemática de veículos e; serviços de entretenimento veiculares e conectividade à Internet.

Em suma, o ambiente IoT permite que objetos físicos “vejam, ouçam, pensem e executem” trabalhos, fazendo com que eles se comuniquem entre si para compartilhar informações e coordenar decisões. A IoT transforma objetos tradicionais em objetos inteligente, então explorando suas tecnologias adjacentes como computação ubíqua e pervasiva, dispositivos embarcados, tecnologias de comunicação, redes de sensores e protocolos e aplicativos da Internet. Esses objetos, juntamente de suas supostas tarefas, constituem aplicações de domínios específicos (mercados verticais), enquanto a computação ubíqua e serviços analíticos formam aplicações de domínio independentes (mercado horizontal), ou seja, permite a interligação e compartilhamento de informações entre todos os graus presentes na rede. A Figura 2 ilustra a arquitetura geral da aplicação da IoT em que cada aplicativo de domínio específico está interagindo com serviços de domínio independentes enquanto, em cada domínio, os sensores e atuadores se comunicam diretamente entre si, Al-Fuqaha et al. (2015).

Figura 2 – Ilustração geral da arquitetura IoT enfatizando os mercados verticais e horizontais e a integração entre eles.



Fonte: Al-Fuqaha et al. (2015).

2.2 REDES DE AMPLA COBERTURA E BAIXA POTÊNCIA

As tecnologias de Redes de Ampla Cobertura e Baixa Potência ou, simplesmente, LPWANs, são adequadas para conectar dispositivos em situações nas quais precisa-se enviar pequenas quantidades de dados com longo alcance enquanto conserva-se a vida útil de suas baterias, Link Labs (2016). Os meios de comunicação tradicionais atuais utilizados como, por exemplo, em *smartphones*, visam uma grande área de cobertura e consomem muita energia, além de terem a capacidade de transmitir grandes pacotes de dados, enquanto os dispositivos IoT requerem menos energia devido aos seus pacotes de dados serem menores. Para melhor atender aos requisitos desses dispositivos, a empresa francesa SigFox, criada em 2010, criou um novo tipo de tecnologia de rede com as seguintes características:

- *Chipsets* e redes de baixo custo;
- Bateria de longa duração;

- Comunicação de dados limitada.

A tecnologia Sigfox envia quantidades muito pequenas de dados (12 bytes) muito lentamente usando métodos de transmissão de rádio padrão (chaveamento de fase, ou BPSK, do inglês *Binary Phase Shift Keying*, para *Uplink* e chaveamento de frequência, GFSK, do inglês *Gaussian Frequency Shift Keying*, para *Downlink*). O longo alcance é obtido como resultado de mensagens muito longas e muito lentas. A Sigfox comercializou sua solução IoT proprietária e agora possui e opera uma rede que usa sua tecnologia e está presente em todos os continentes, atualmente, Link Labs (2018). Para fornecer confiabilidade, o Sigfox transmite um mesmo pacote de dados várias vezes, resultando em alto consumo de energia. Um único *gateway* pode lidar com até um milhão de objetos conectados, com uma área de cobertura de 30 a 50 km em áreas rurais e 3 a 10 km em áreas urbanas, (CHAUDHARI; ZENNARO; BORKAR, 2020).

Hoje, a Sigfox não é a única organização que cria e desenvolve a tecnologia LPWAN. A empresa Semtech desenvolveu o LoRa, outra tecnologia de radiofrequência que usa espectro de rádio não licenciado para permitir comunicação de baixa potência e ampla área entre dispositivos. Outra tecnologia conhecida de LPWAN é a NB- IoT, ou *Narrow Band IoT* (Banda Estreita para Internet das Coisas), que foi projetada para viabilizar a aplicação da IoT em maior escala. É ideal para projetos que abrangem uma grande área, mas que não demandam um grande volume de transmissão de dados, Link Labs (2016).

Segundo Mekki et al. (2019), não existe uma solução definitiva de tecnologia LPWAN no mercado, capaz de satisfazer qualquer tipo de aplicação. Existem muitos fatores a serem comparados entre as tecnologias para facilitar a escolha do instrumento mais adequado para uma dada aplicação, porém as principais seriam:

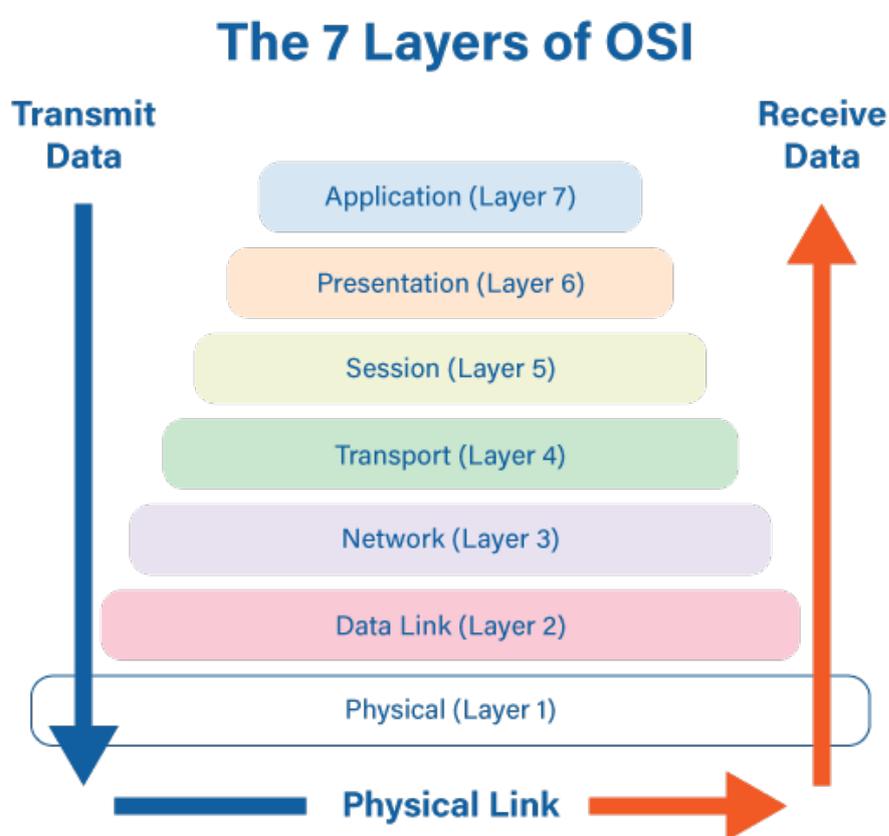
- Qualidade de serviço;
- Vida útil da bateria;
- Latência;
- Escalabilidade;
- Tamanho de *Payload* (carga útil);
- Cobertura;
- Alcance;
- Custo de implantação.

2.3 LORA E LORAWAN

Como ponto de partida, é necessário estabelecer a diferença entre os termos: LoRa (acrônimo de *Long Range* ou, em português, Longo Alcance), é uma técnica de modulação de RF criada

pela empresa Semtech, para LPWANs. De uma forma mais simples, é uma maneira de manipular uma onda de radiofrequência para codificar informações para transmiti-las. Trata-se da camada PHY (*Physical Layer*), a responsável por selecionar as frequências que serão utilizadas, gerar a portadora, detectar, modular e codificar o sinal. Dentro do modelo de sete camadas OSI (*Open System Interconnection*), criado em 1984, parâmetro para protocolos de comunicação que define a função entre diferentes tipos de sistemas, o LoRa pertence a primeira camada, como pode ser visto na Figura 3. É importante salientar que o termo LoRa por si só não descreve funcionalidades acima da camada física que estabelece, mesmo que, muitas vezes, seja utilizado para representar diretamente aplicações que utilizam a tecnologia, LINK LABS (2018).

Figura 3 – Modelo de Sete Camadas OSI.



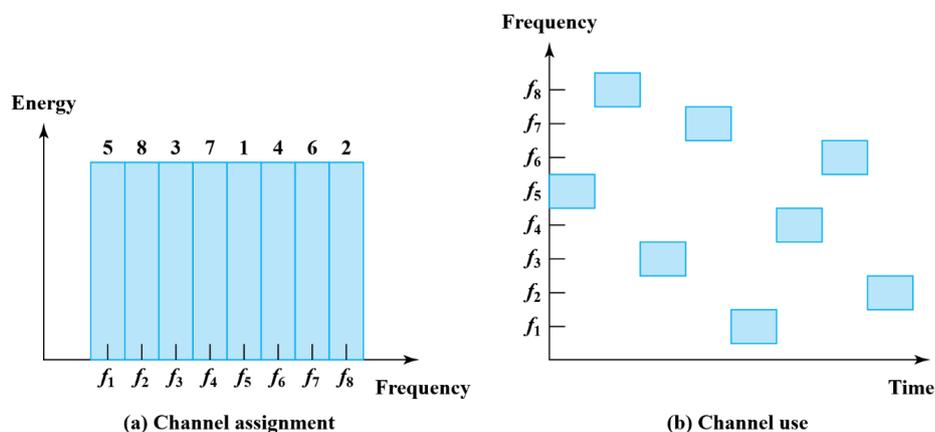
Fonte: George Bouchard (2020). Disponível em: <<https://insights.profitap.com/osi-7-layers-explained-the-easy-way>>. Acessado em: 14/01/2022.

LoRaWAN, por sua vez, é um protocolo de camada de controle de acesso de mídia ou, simplesmente, MAC-Layer (do inglês, *Media Access Control Layer*), construído tendo como base a modulação LoRa. Trata-se de uma camada de *software* que define como os dispositivos utilizam o *hardware* LoRa, por exemplo, ao transmitirem o sinal modulado, e qual o formato das mensagens, pertencendo então à segunda camada do modelo OSI, (The Things Network, 2017).

2.4 A MODULAÇÃO LORA

A modulação utilizada na tecnologia LoRa é derivada da tecnologia CSS (do inglês, *Chirp Spread Spectrum*). O termo *Chirp*, pode ser traduzido como “trinado”, lembrando o canto curto de pássaros como o de um canário, enquanto *Spread Spectrum* ou, Espectro Espalhado, indica uma técnica de modulação onde a energia de rádio é espalhada numa faixa de frequências muito mais larga do que a necessária para a transmissão da informação em condições normais. Esta tecnologia já vem sendo utilizada desde 1940, sendo aplicada em radares e também em aplicações militares de comunicação segura. A Figura 4 mostra um exemplo de modulação em Espectro Espalhado chamado de *Frequency-Hopping* (saltos em frequência). Nesta tecnologia, o processo de codificação é realizado usando o princípio de chaveamento por deslocamento de frequência (FSK). A transmissão de dados do usuário utiliza um conjunto de diferentes frequências que são alteradas de forma pseudo-aleatória. Desde que a sequência de saltos de frequência seja conhecida pelo receptor, é possível recuperar o sinal de dados do usuário sem perder nenhuma informação. Os principais parâmetros utilizados para caracterizar esta técnica de espalhamento de espectro são: o conjunto de saltos que representa o número de frequências utilizadas; a taxa de salto representando o número de mudanças de frequência por unidade de tempo, e o tempo de permanência, ou seja, tempo que uma mesma frequência é utilizada continuamente, Pereira, Postolache e Girao (2009).

Figura 4 – Exemplo de *Frequency-Hopping*.

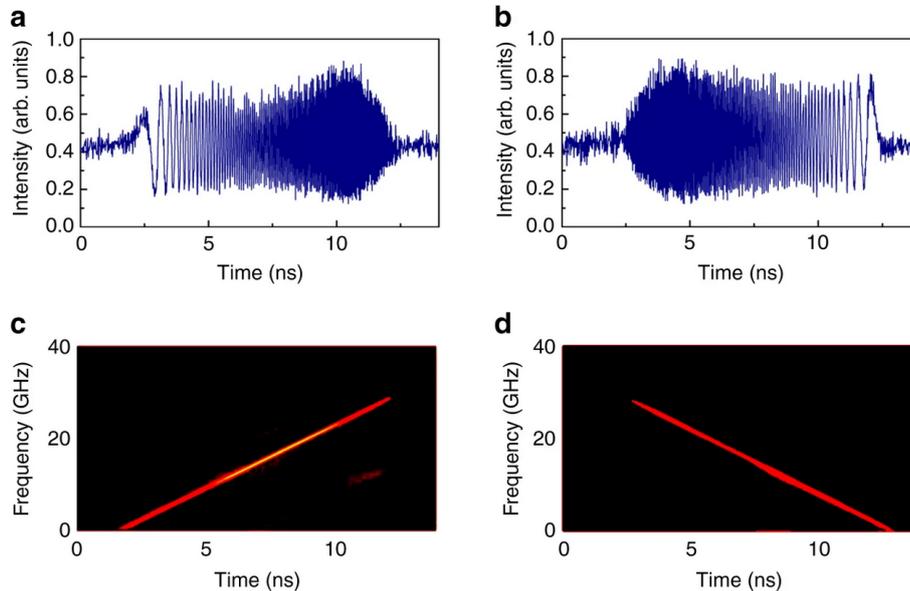


Fonte: Stallings (2007).

De uma maneira similar, a técnica de “trinados” empregada pela modulação LoRa utiliza-se do método de Espectro Espalhado, porém a codificação acontece através de pulsos *chirp*. Como mencionado anteriormente, a modulação de sinais na arquitetura LoRa é propagada em faixas de frequência *ISM* não licenciadas, facilitando a sua utilização por entidades e reduzindo o custo de seu uso. Durante sua transmissão, quando a frequência é crescente temos um "Up-Chirp" e se ela decresce temos um "Down-Chirp". Os chirps são deslocados ciclicamente, isto é, quando se atinge a frequência mais alta retorna-se para a frequência mais baixa. A Figura 5 demonstra

exemplos de sinais do tipo "chirp", sendo à esquerda um sinal de frequência crescente (*Up-Chirp*) e à direita um sinal decrescente (*Down-Chirp*).

Figura 5 – Espectro de sinal de *Up-Chirp* e *Down-Chirp*, à esquerda e à direita, respectivamente.



Fonte: Chatellus et al. (2018).

Dessa forma, a informação que qualquer sinal carrega é dada pelos saltos de frequência, sendo que um salto quando decodificado, representará um símbolo que, por sua vez, representará um ou mais *bits* de dados, configurando 2^{SF} valores possíveis. Segundo Mroue et al. (2018), a modulação LoRa pode ser interpretada como uma modulação de fase contínua sem memória, onde a forma de onda transmitida em cada intervalo de símbolos depende apenas do símbolo naquele intervalo, e não de símbolos anteriores ou sucessivos.

O fator exponencial apresentado no parágrafo anterior é denominado *Spread Factor* (Fator de Espalhamento), e representa o número de *bits* da modulação e o tempo de duração de um *Chirp* (sua velocidade). A modulação LoRa possui um total de seis fatores de espalhamento (de SF7 a SF12). Quanto maior o fator de espalhamento utilizado, mais longe o sinal poderá viajar e ainda poderá ser recebido sem erros pelo receptor. Em suma, os Fatores de Espalhamento influenciam na taxa de dados, no tempo no ar, na duração da bateria e na sensibilidade do receptor. A tabela a seguir mostra como os fatores de espalhamento afetam a sensibilidade de um receptor para o caso de uma largura de banda de 125 KHz, (The Things Network, 2019).

Segundo Semtech Corporation (2019), é importante ressaltar que os Fatores de Espalhamento da modulação LoRa são inerentemente ortogonais. Isso significa que os sinais modulados com diferentes Fatores de Espalhamento e transmitidos no mesmo canal de frequência ao mesmo tempo não interferem entre si. Em vez disso, os sinais em diferentes Fatores de Espalhamento parecem, simplesmente, serem ruídos entre si. Em suma, com a adoção dessa tecnologia obtém-se uma série de vantagens nas comunicações de longo alcance utilizando-se baixa potência, tais como:

Tabela 1 – Fatores de Espalhamento e sensibilidade de recepção.

Fator de Espalhamento (SF)	Sensibilidade do receptor para largura de banda fixa em 125 kHz
SF7	-123 dBm
SF8	-126 dBm
SF9	-129 dBm
SF10	-132 dBm
SF11	-134.5 dBm
SF12	-137 dBm

Fonte: adaptado de The Things Network (2019).

- Os sinais LoRa são robustos e muito resistentes a interferência de mecanismos que operam tanto dentro de sua banda, quanto em outras;
- Adequação para locais urbanos e suburbanos, devido a capacidade de rejeição de sinais *multi path* (múltiplos trajetos) e *fading* (desvanescimento), onde ambos os mecanismos são predominantes;
- Segurança no envio de dados e maior capacidade de alcance com utilização de baixa potência em comparação com outras modulações de Espectro Espalhado por um baixo custo.

Por fim, a Figura 6 exhibe uma tabela contendo as características gerais da modulação LoRa diante de suas possíveis configurações.

Figura 6 – Características da Modulação LoRa.

Taxa de Dados	Fator de Espalhamento	Frequência de Canal	Uplink ou Downlink	Taxa de Bits (Bits/s)	Tamanho máximo de Payload (Bytes)
0	SF10	125 kHz	Uplink	980	11
1	SF9	125 kHz	Uplink	1,760	53
2	SF8	125 kHz	Uplink	3,125	125
3	SF7	125 kHz	Uplink	5,470	242
4	SF8	500 kHz	Uplink	12,500	242
5 – 7					
8	SF12	500 kHz	Downlink	980	53
9	SF11	500 kHz	Downlink	1,760	129
10	SF10	500 kHz	Downlink	3,125	242
11	SF9	500 kHz	Downlink	5,470	242
12	SF8	500 kHz	Downlink	12,500	242
13	SF8	500 kHz	Downlink	21,900	242

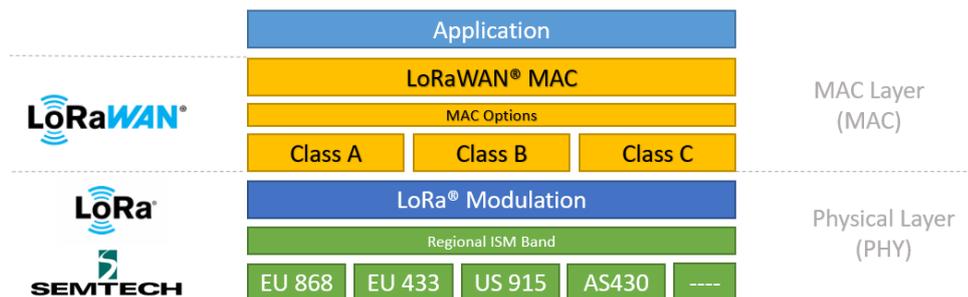
Fonte: adaptado de Semtech Corporation (2019).

2.5 O PROTOCOLO LORAWAN

Como esclarecido no primeiro parágrafo desta seção, segundo The Things Network (2017), LoRaWAN é o nome dado ao protocolo que define a arquitetura dos sistemas que utilizam a modulação LoRa como base, bem como seus parâmetros de comunicação. É um protocolo de rede aberto que oferece serviços seguros de comunicação bidirecional, mobilidade e localização padronizados e mantidos pela LoRa Alliance. O uso da LoRaWAN em espaços industriais e cidades inteligentes vem crescendo nos últimos anos devido a ser um protocolo de comunicação bidirecional de longo alcance acessível com consumo de energia muito baixo.

A Figura 7 apresenta a hierarquia das tecnologias e conceitos empregados. Como já mencionado e agora ilustrado, LoRa é a camada física, operante em frequências regionais não licenciadas e acima desta está o protocolo de rede LoRaWAN. No Brasil, a ANATEL publicou em 2017 o Ato 14448 regulamentando a tecnologia LoRa no Brasil, definindo o plano de frequência sendo o padrão Australiano de 923 MHz (915 MHz a 928 MHz). A arquitetura definida para esta rede será apresentada na subseção a seguir.

Figura 7 – Hierarquia para uma aplicação baseada na modulação LoRa



Fonte: Semtech Corporation (2019).

2.5.1 A ARQUITETURA DE UMA REDE LORAWAN

A Figura 8 apresenta a arquitetura típica da implementação de uma rede LoRaWAN ponta-a-ponta. A descrição de cada elemento integrante, segundo Semtech Corporation (2019), está a seguir:

1. *End Devices* (Dispositivos Finais): são os elementos ou módulos básicos da rede. São os sensores ou atuadores que são conectados por sinais de radiofrequência a uma rede LoRaWAN através de *Gateways* de rádio utilizando a modulação LoRa. Exemplos: sensores de temperatura, movimento, leitores de consumo de energia, de água, de gás, botões de pânico, controladores de irrigação, etc;
2. *Gateways*: são os receptores dos sinais enviados pelos rádios. Um só *gateway* pode receber os dados de milhares de dispositivos e encaminhá-los para um servidor de rede e, dependendo das condições da topologia do local, pode cobrir raios de 2 Km até 15 Km;

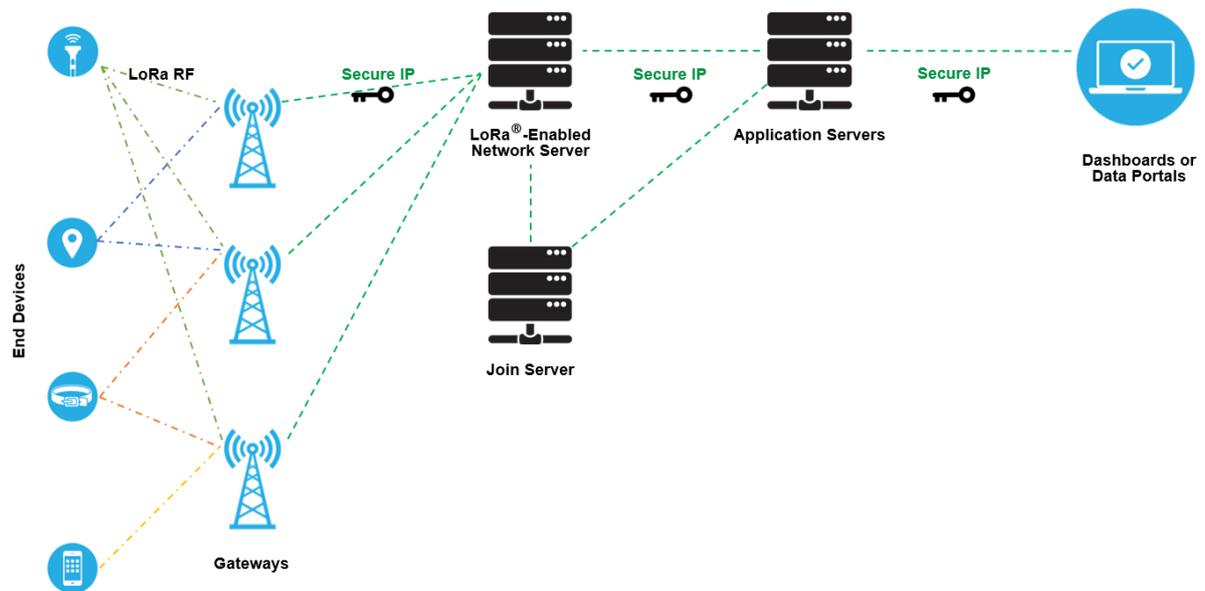
3. *Network Server* (Servidores de Rede): os servidores de rede garantem a autenticidade de cada sensor na rede e a integridade de cada mensagem. São os responsáveis pelo gerenciamento das informações enviadas pelos *gateways*. Como existe a possibilidade de dois ou mais *gateway* receberem o mesmo pacote de um certo módulo e encaminharem para o servidor, o mesmo elimina pacotes duplicados, gerencia os tempos para retorno de reconhecimento (*acknowledgement - ACK*), e executa os ajustes para adaptar as taxas de dados (*Data Rate - DR*) de forma a administrar os tempos entre as comunicações e o consumo de energia;
4. *Join Server* (Servidor de Junção): contendo informações dos dispositivos como: DevEUI (Identificador Exclusivo Serial do Dispositivo Final), AppKey (Chave de Criptografia do Aplicativo), NwkKey (Chave de Criptografia de Rede), Application Server identifier (Identificador do Servidor de Aplicativos), End-Device Service Profile (Perfil de Serviço do Dispositivo Final), os servidores de junção gerenciam o processo de ativação durante a transmissão para adicionar Dispositivos Finais à rede. Ele sinaliza ao Servidor de Rede qual Servidor de Aplicativos deve ser conectado ao dispositivo final e executa as derivações de chaves de criptografia da sessão de rede e de aplicativos. Ele comunica qual *Network Session Key* (Chave de Sessão de Rede) do dispositivo ao Servidor de Rede e qual *Application Session Key* (Chave de Sessão de Aplicações) para o Servidor de Aplicações correspondente;
5. *Application Servers* (Servidores de Aplicações): os Servidores de Aplicações são responsáveis por manipular, gerenciar e interpretar de forma segura os dados dos provenientes dos sensores e atuadores, além de gerarem todos *Payloads* de *Downlink* da camada de aplicações para os Dispositivos Finais conectados. Exemplos: no caso de medidores de energia, o correspondente Servidor de Aplicação enviaria para a companhia elétrica os dados de consumo. Para um sistema de monitoramento de enchentes, enviaria para os órgãos de defesa civil e bombeiros um sinal de alerta;
6. *Dashboards or Data Portals* (Painéis Visuais ou Portais de Dados): por fim, encontram-se os meios de exibição dos dados já tratados e interpretados. Podem ser aplicativos de celulares, páginas *web*, painéis de controle interno na indústria, etc.

2.5.2 CLASSES DE DISPOSITIVOS LORAWAN

Segundo Semtech Corporation (2019), para atender às mais diversas necessidades no protocolo LoRaWAN foram definidas três classes de dispositivos que operam simultaneamente. São elas: classes A, B e C, e suas definições são as seguintes:

- Classe A: trata-se dos sensores, os quais não possuem um determinado momento para enviarem dados aos *Gateways* - puramente assíncronos, eles simplesmente transmitem

Figura 8 – Arquitetura típica de uma rede LoRaWAN.



Fonte: Semtech Corporation (2019).

sempre que necessário e permanecem inativos até então (são otimizados para reduzir seu consumo energético). Possuem comunicação bi-direcional, porém não podem ser requisitados por aplicações. Após transmitirem seus dados, aguardam por um curto período (normalmente um segundo), uma resposta da rede e mesmo que não a recebam, retornam ao seu estado de inatividade até que uma próxima transmissão seja necessária.

- Classe B: são os dispositivos atuadores, dessa forma permitem, além da transmissão, a recepção de dados e requisições da rede, ou seja, fornecem janelas de recebimento programadas regularmente, além daquelas que são abertas sempre que um *Uplink* é enviado ao servidor. Esse processo de comunicação com a rede ocorre através de um processo denominado *beaconing*, que nada mais é do que um processo de troca de informações (denominadas "beacons") para sincronizar os tempos entre a rede e os atuadores.
- Classe C: a Classe C permite que os Dispositivos Finais estejam aptos a receberem mensagens de *Downlink* a qualquer momento, diferentemente dos períodos programados na Classe B. Normalmente, os dispositivos nessa classe são alimentados pela rede elétrica (alimentação C.A.) ao invés de baterias porque é preciso muita energia para mantê-los aptos a recepção em tempo integral.

2.5.3 LORA ALLIANCE

A LoRa Alliance® é uma associação aberta e sem fins lucrativos e é a responsável por manter o protocolo LoRaWAN ativo. Se tornou uma das maiores e de mais rápido crescimento no setor

de tecnologia desde sua criação em 2015. Seus membros colaboram de perto e compartilham experiências para promover e impulsionar o sucesso do padrão LoRaWAN como o padrão global aberto líder para conectividade IoT-LPWAN segura e ao nível de uma operadora, (LoRa Alliance, 2019).

2.6 ANTENAS E PROPAGAÇÃO

Antenas são mais largamente empregadas no campo das comunicações; contudo, a comunicação elétrica, incluindo comunicações sem fio, é um desenvolvimento recente na história da humanidade. Em 1842, Joseph Henry, da Universidade de Princeton, efetuou o que talvez tenha sido o primeiro experimento de radiação. Ele “lançou uma faísca” em um circuito, em uma sala no pavimento superior, e observou que agulhas eram magnetizadas por correntes em um circuito receptor localizado no porão. Esse experimento foi estendido a uma distância de mais de um quilômetro, Stutzman e Thiele (2017).

Basicamente, há duas maneiras para se transferirem sinais elétricos entre dois pontos: através de uma linha de transmissão, de forma a confinar a energia das ondas eletromagnéticas na região próxima ou no interior da linha, ou pelo espaço livre, através da utilização de antenas, Stutzman e Thiele (2017). Segundo o IEEE (2014) pode-se definir uma antena como “a parte de um sistema de transmissão ou recepção projetada para radiar ou receber ondas eletromagnéticas”.

Para a aplicação ou escolha de uma antena de forma correta a uma dada solução, algumas das características importantes de antenas como irradiadores de energia eletromagnética devem ser notados, Sadiku (2012). Estas características e suas definições básicas estão a seguir:

- Diagrama de Irradiação: consiste em um gráfico tridimensional da irradiação de uma antena em região distante, Sadiku (2012);
- Diretividade: é a capacidade de uma antena de concentrar a energia irradiada numa determinada direção;
- Ganho: o ganho é expresso, normalmente, em relação a um radiador isotrópico, ou seja, um elemento capaz de irradiar igualmente em todas as direções do espaço com eficiência máxima. Dessa forma, o valor de ganho de uma antena representa sua capacidade de irradiar em uma dada direção comparada ao elemento isotrópico, e tem seu valor dado em dBi.

O caminho primário pelo espaço da antena transmissora à receptora é uma linha nominalmente reta. É possível, no entanto, que o sinal seja refletido por objetos que, embora não estejam no caminho direto, estejam próximos o suficiente para estarem dentro da largura do feixe das antenas. Se isso acontecer, qualquer porção do sinal transmitido que seja refletida em direção à antena receptora chegará em atraso ao sinal direto devido ao comprimento do caminho mais longo envolvido. O impacto dessa onda refletida dependerá da natureza da superfície da

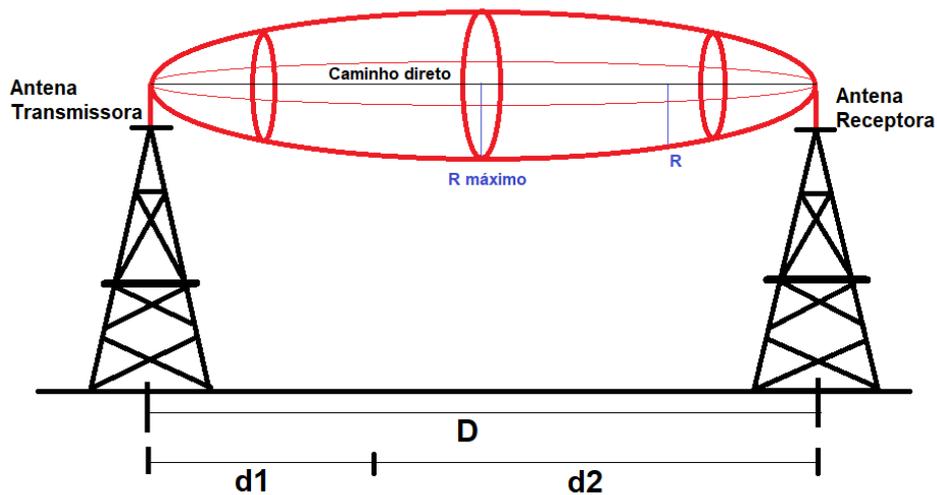
qual o sinal é refletido, da diferença no comprimento do caminho e do padrão das antenas de transmissão e recepção, Large e Farmer (2009). Segundo Hudson (1993), os efeitos de reflexões e obstruções geralmente recebem atenção maiores para sistemas operantes em frequências mais baixas, pois os caminhos são muito mais longos e a busca por um posicionamento ideal se torna mais complicado.

Em um sistema de comunicação sem fio, a Zona de Fresnel é a região tridimensional de formato elipsoidal no espaço ao redor da linha de visão (caminho de transmissão direta) entre uma antena transmissora e receptora. O raio da n-ésima Zona de Fresnel pode ser obtida através da Equação 1:

$$R[n] = \sqrt{\frac{n \times \lambda \times d1 \times d2}{D}} \quad (1)$$

Onde λ é o comprimento de onda na frequência da comunicação, $d1$ e $d2$ são as distâncias entre as antenas e o ponto de interesse do elipsoide e D é a distância em linha reta entre ambas. A Figura 9 ilustra o descrito.

Figura 9 – Zona de Fresnel.



Fonte: o Autor (2022).

O valor do maior raio do elipsoide (central) para a primeira Zona de Fresnel ($n = 1$) é obtido quando faz-se:

$$d1 = d2 = D/2 \quad (2)$$

Considerando que as ondas eletromagnéticas se propagam a velocidade da luz (299.792.458 m/s), podemos reduzir a equação 1 para uma forma mais simples utilizando-se da relação expressa pela Equação 4:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

Onde c é a velocidade da luz e f a frequência de operação do sistema. Se utilizarmos o expresso pela Equação 2, obtemos a seguinte equação para o maior raio do elipsoide para a primeira Zona de Fresnel, dado em metros:

$$R_{max} = 17,31 \times \sqrt{\frac{D}{4 \times f}} \quad (4)$$

Para a qual deve-se usar o valor de D em km e f em GHz.

Embora interferências notadas em ordens superiores possam causar problemas com superfícies altamente refletivas que são orientadas de forma ideal (como terrenos lisos, planos ou águas calmas), a regra geral para um projeto de comunicação eletromagnética é o elipsoide tridimensional para a Zona de Fresnel de primeira ordem deve estar ao menos 60% livre de obstáculos, e idealmente acima de 80%, Large e Farmer (2009).

2.7 ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Para propósitos de engenharia, o solo é definido como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas) com líquido e gás nos espaços vazios entre as partículas sólidas. O solo além de ser utilizado como material de construção em vários projetos de engenharia civil, também é responsável por suportar os carregamentos advindos de estruturas, sejam elas obras de terra ou edificações, por exemplo. Portanto, engenheiros civis precisam estudar as propriedades do solo, bem como sua origem, distribuição granulométrica, capacidade de drenar água, compressibilidade, resistência ao cisalhamento, e capacidade de carga. A mecânica dos solos é o ramo da ciência que lida com o estudo das propriedades físicas do solo e o comportamento da massa de solo sujeita a vários tipos de forças. A engenharia de solos é a aplicação dos princípios da mecânica dos solos a problemas práticos. A engenharia geotécnica é a subdisciplina da engenharia civil que envolve materiais naturais encontrados próximos à superfície da Terra. Isso inclui as aplicações dos princípios de mecânica dos solos e das rochas a projetos de fundações, estruturas de contenção e estruturas geotécnicas, Das (2006).

2.7.1 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

A instrumentação geotécnica é utilizada no mundo todo, particularmente em áreas urbanas, para registrar as respostas físicas de solos e estruturas a fenômenos naturais e novos trabalhos de engenharia civil. Ela possibilita a engenheiros a determinação do desempenho e impacto de muitos projetos consideráveis. O resultado é também utilizado para registrar e controlar trabalhos de remediação e para avaliação de segurança, Bassett (2012).

Existem duas categorias gerais de instrumentos de monitoramento. A primeira categoria se refere à determinação de propriedades de solos e rochas, por exemplo, resistência, compressibilidade, e permeabilidade, normalmente durante a fase de dimensionamento de um projeto. A segunda categoria é usada para o monitoramento do desempenho, normalmente durante a

fase de construção ou operação de um projeto, e pode envolver medição das pressões de água, tensões totais, deformação, carga ou deformação, Dunnycliff (1993).

Um projetista de uma estrutura metálica trabalha com materiais manufaturados. Os materiais são especificados, a fabricação é controlada, e valores razoáveis de propriedades de engenharia estão disponíveis para o projeto. Uma análise acurada pode ser feita e planos de dimensionamento e especificações preparados. Então, a obra está de acordo com esses planos, e a estrutura vai se comportar como previsto. Em geral não haverá necessidade de se monitorar o comportamento de campo. Observações similares podem ser feitas a respeito de concreto armado. Em contraste a isso, o dimensionamento de obras geotécnicas vai ser baseado na escolha dos valores mais prováveis dentro de uma faixa de valores possíveis para propriedades de engenharia. Conforme a construção avança e as condições geotécnicas são observadas e seu comportamento monitorado, a escolha do dimensionamento pode ser avaliada e, se necessário, atualizada. Assim, as observações de engenharia durante a construção são frequentemente uma parte integral do processo de dimensionamento, e a instrumentação geotécnica é uma ferramenta que auxilia essas observações, Dunnycliff (1993).

2.8 PRODUTOS E TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, serão apresentados produtos que são usualmente utilizados para monitoramentos, além de trabalhos relacionados. Serão ressaltados os prós e contras de cada tecnologia quando relacionadas ao monitoramento geotécnico.

2.8.1 FIELDLOGGER NOVUS

O FieldLogger é um registrador de dados para manipulação de variáveis analógicas e digitais. Possui 8 entradas analógicas configuráveis por software para sinais de tensão, corrente, termopares, Pt100 e Pt1000. Dispõe ainda de 2 saídas a relé e 8 portas digitais individualmente configuráveis como entrada ou saída. Possui até 128 canais para o cálculo de grandezas a partir das informações medidas. Até 32 ocorrências de alarmes podem ser detectadas, permitindo o acionamento de saídas, envio de e-mails ou de *traps* SNMP. Utiliza-se de um RTC interno, alimentado individualmente para precisão na gravação de data e hora, Novus (2022).

Possui interface de comunicação RS485, o que o torna mais adequado a ambientes industriais, opera com o protocolo Modbus RTU e pode ser configurado como mestre ou escravo, o que permite a aquisição de até 64 canais externos para registro. Possui conexão com a internet através de interface Ethernet que permite o acesso ao equipamento por navegador (HTTP), FTP (cliente e servidor), envio de e-mails (SMTP), SNMP e Modbus TCP. Possui uma interface USB para conectar a um computador (configuração, monitoramento ou coleta) e outra para a conectar um pen drive (coleta). Com memória básica para 512k registros, permite ainda expansão por cartão SD, Novus (2022).

O Fieldlogger Novus é um aparelho bastante útil, porém limitado em relação ao monitoramento geotécnico. Além de não possuir uma construção favorável para um ambiente externo, limita a utilização de sensores a apenas de saídas analógicas, ou seja, sensores mais avançados com saídas digitais não podem ser utilizados, já que não possui interface que permita sua utilização. Por fim, a sua aplicação no âmbito do monitoramento geotécnico limita-se a regiões onde exista conexão com a Internet, sem a qual não possui forma de transmissão dos sinais dos sensores. A Figura 10 mostra o aparelho comercializado.

Figura 10 – Registrador de Dados Fieldlogger Novus.



Fonte: Novus (2022).

2.8.2 HOBO RX3000

A Hobo RX3000 é uma estação registradora de dados para monitoramento remoto produzida pela marca ONSET. São três as versões do equipamento, variando entre si quanto a sua forma de comunicação ou interface. Duas delas utilizam conexão com a Internet, sendo uma por interface Ethernet e a outra por Wifi. A terceira se utiliza de comunicação celular (GSM). Com a compra da estação GSM, pode ser adquirido juntamente um plano para o monitoramento, dando acesso a uma plataforma *online*. Nesta plataforma, chamada *Hobolink*, estão presentes

as possíveis configurações da estação, além de gráficos e tabelas dos dados dos sensores lidos em campo. Esse *website* ainda permite a exportação de um link para exibição de resultados em outras páginas ou para o compartilhamento direto com interessados, ONSET (2022). A Figura 11 mostra uma estação Hobo RX3000.

Figura 11 – Estação de monitoramento Hobo RX3000.



Fonte: ONSET (2022).

A linha Hobo RX3000 é adequada para uso em ambientes internos e externos. Sua versão com comunicação celular (GSM) o torna mais apto ao monitoramento geotécnico, porém não uma solução definitiva. A estação possui um sistema *Plug-and-play* para a utilização de sensores inteligentes comercializados pela própria marca, além de módulos analógicos para sensores com tais respostas. Possui uma bateria interna que pode ser recarregada a partir de uma placa fotovoltaica, ONSET (2022).

A estação Hobo RX3000 é um produto que apresenta um maior nível de sofisticação e adequação ao monitoramento geotécnico. Apesar de também limitar a utilização de sensores a analógicos ou sensores inteligentes da própria marca, oferece um grande diferencial: sua plataforma *online*. O *website* oferecido como interface para apresentação dos dados dos sensores é uma solução completa com ótimos recursos, tornando a Hobo uma ótima opção para a geotecnia. Um ponto negativo para este sistema está relacionado ao seu valor; por ser um aparelho importado, tanto sua aquisição quanto seu custo de manutenção são bastante altos.

2.8.3 TRABALHOS RELACIONADOS

O trabalho de conclusão de curso com o título de “Rede LoRa® e Protocolo LoRaWan® Aplicados na Agricultura de Precisão no Brasil”, apresenta um estudo de viabilidade de aplicação

de uma rede utilizando-se a modulação LoRa e seu protocolo LoRaWan, além dos conceitos de IoT, no sensoriamento de campo a fim de otimizar a produção em propriedades agrícolas. Para isso, foi proposto a aquisição de um *gateway* comercial, um sensor BME280, para monitoramento de pressão, temperatura e umidade, e a utilização do servidor de rede LORIOT (Limited Free Account), Teixeira e Almeida (2017).

Este servidor é um sistema aberto, de protocolo LoRaWAN e permite administrar apenas um *gateway*, com o número máximo de 10 dispositivos terminais em sua versão livre. Ele permite que os dados enviados pelos sensores para o *gateway* sejam enviados diretamente à nuvem de um sistema próprio, disponíveis para serem solicitados pelo usuário, ou diretamente para o *software* de aplicação, sem armazená-los, Teixeira e Almeida (2017).

Por fim, os autores concluíram que o aplicação do sistema é viável devido aos valores envolvidos na aquisição e manutenção serem baixos comparados a outras tecnologias e pelo fato do consumo energético ser bastante reduzido. Porém, apesar dos resultados positivos em relação a usabilidade e funcionalidade da modulação LoRa e seu protocolo LoRaWan em áreas rurais, esta solução apresenta imperfeições ao monitoramento geotécnico, principalmente pelo fato de não haver garantia de armazenamento de dados independente da comunicação.

Outra aplicação da modulação LoRa juntamente do conceito IoT em região rural, foi para o monitoramento de princípios de incêndio na província de Riau, na Indonésia. Segundo Kadir, Efendi e Rosa (2018), com a tecnologia LoRa, os dados podem ser transmitidos a cerca de 30 milhas (em torno de 48 km), o que é suficiente para cobrir parte da província de Riau que foi duramente impactada por recentes incêndios. Neste artigo se propõe desenvolver um sistema de sensores capaz de detectar um princípio de incêndio florestal para os quais os estes estarão localizados em locais que já foram focos repetitivos anteriormente. A tecnologia LoRa e o conceito IoT a ser implantado devem fornecer uma plataforma para conectar os sensores e indicar de forma precoce incêndios terrestres ou florestais. É de vital importância que uma rápida ação do sistema possa ocorrer como forma de prevenção aos incêndios antes que se tornem incontroláveis e devastadores. Ao fim do estudo, concluiu-se que com o sistema proposto os dados ambientais podem ser enviados para o servidor de aplicação em tempo mínimo para alcançar o sistema de monitoramento em tempo real, se mostrando adequado para a finalidade.

Segundo Ribeiro (2019), também em seu trabalho de conclusão de curso intitulado “Uma aplicação da tecnologia LoRa em um ambiente hospitalar”, o desempenho dos *End Devices* em relação à distância foram superiores às distâncias de redes sem fio convencionais. A modulação utilizada demonstra certa robustez do sinal em relação a ruídos, possibilitando a recepção de mensagens corretas pelo *Gateway*, mesmo em maiores distâncias e com obstáculos. Em seu trabalho, Ribeiro (2019) realizou os testes utilizando-se de dois sensores de temperatura e um *gateway* comercial para estabelecer a rede LoRa proposta. A aplicação dentro de um ambiente hospitalar, em área urbana realizada, evidencia ainda mais a capacidade e a robustez da modulação LoRa diante de fatores interferentes, tanto físicos quanto em relação a outras tecnologias, presentes no local.

Outras duas pesquisas em aplicações em área urbana do protocolo LoRa e sua rede Lorawan são a utilização do protocolo para o estabelecimento de casas inteligentes e para o desenvolvimento de sistemas de iluminação de ruas. A primeira dessas é descrita por Wildan, Hamidi e Juhana (2020), a qual foi realizada a partir da coleta de dados, *design* de *software*, testes e análise. As conclusões tomadas deste trabalho foram em torno da eficiência da modulação quanto a velocidade para tomadas de decisão e quanto ao alcance da tecnologia, sendo de 3,86 segundos de atraso médio para o controle de equipamentos eletrônicos baseado na atuação de sensores conectados aos mesmos, e de 183 m em espaço semi-aberto, respectivamente. Já o estudo realizado sobre iluminação inteligente de ruas foi simulado para um distrito no Senegal, para o qual SARR, GUEYE e SARR (2019) propôs uma aplicação baseada em LoRa para gerenciar um sistema de iluminação pública, estudando perda de pacotes, ocorrência de colisões e consumo de energia. Os resultados da simulação mostram que vários *gateways* podem melhorar significativamente o desempenho da rede, reduzindo a taxa de perda de pacotes e colisões em até 20%. Para mais de três *gateways*, a melhoria não é significativa. Além disso atestaram que o SF10 (fator de espalhamento igual a 10), apresentou melhores resultados comparados ao SF12, recomendado para tal propósito.

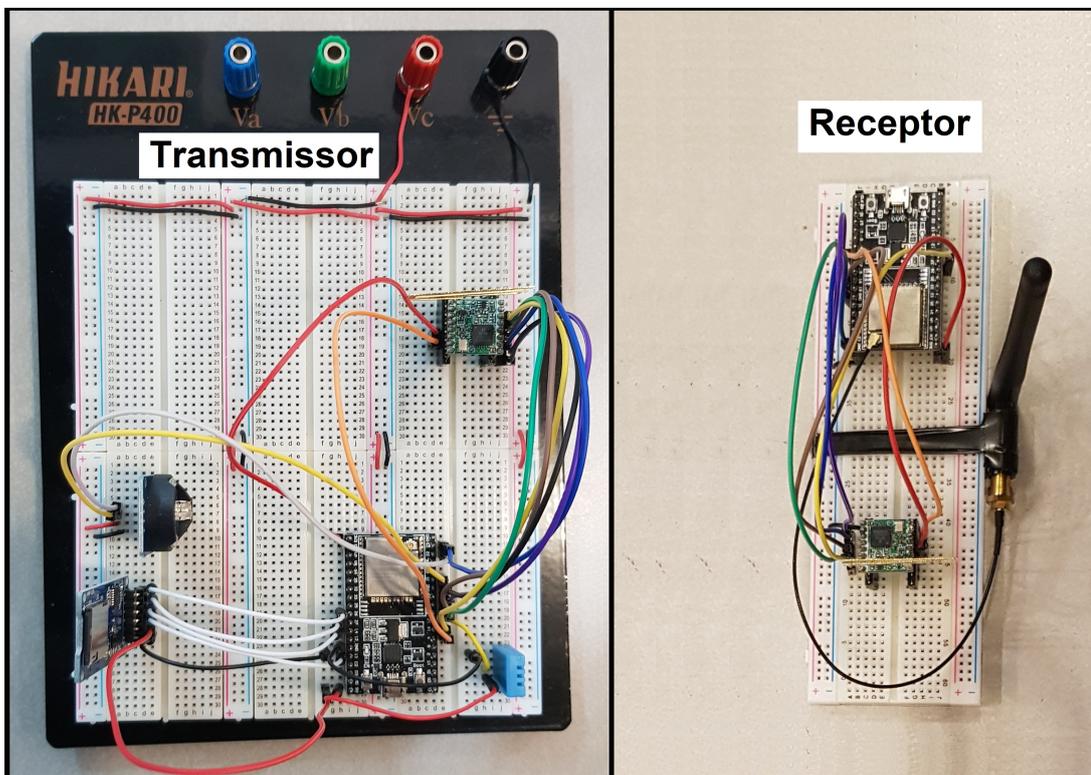
3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo serão apresentados os elementos utilizados para a montagem dos módulos transceptores LoRa, assim como os locais escolhidos para os testes e os motivos pelos quais foram selecionados. Também serão apresentados os resultados obtidos para ambos.

3.1 CONSTRUÇÃO DOS RÁDIOS TRANSCÉPTORES

Como ponto de partida para o desenvolvimento dos testes de campo foi necessário efetuar a escolha dos elementos que fariam parte dos equipamentos transmissor e receptor, além dos demais componentes empregados visando não somente enriquecer os testes, mas também embasar o desenvolvimento futuro de um equipamento mais adequado à aplicação ao monitoramento geotécnico. Os rádios foram montados em duas placas de prototipação. A Figura 12 mostra ambos equipamentos já prontos, sendo à esquerda o rádio utilizado como transmissor nos testes, contendo o sensor a ser monitorado, e à direita o rádio receptor. A seguir, os componentes eletrônicos utilizados serão apresentados individualmente, juntamente de suas características e funções relevantes ao projeto. Os demais itens presentes na montagem que não serão melhor descritos na sequência são conexões do tipo *jumpers*, fios e adaptadores.

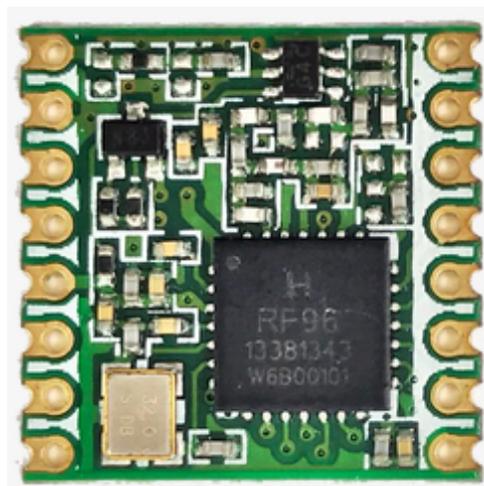
Figura 12 – Rádios Transceptores montados em placas de prototipação.



Fonte: o Autor (2022).

- 1 Rádio Transceptor RFM95W e Antena: a Figura 13 ilustra um rádio transceptor munido da tecnologia LoRa fabricado pela empresa Hope RF. A versão utilizada do produto opera na frequência de 915 MHz, estando em acordo com o informado anteriormente para utilização da modulação no Brasil. As principais características do rádio são: interface de comunicação SPI *serial Peripheral Interface*; potência de transmissão de 20 dBm; máximo *link budget* de 168 dBm e sensibilidade de recepção de até -148 dBm.

Figura 13 – Rádio Transceptor LoRa RFM95W.



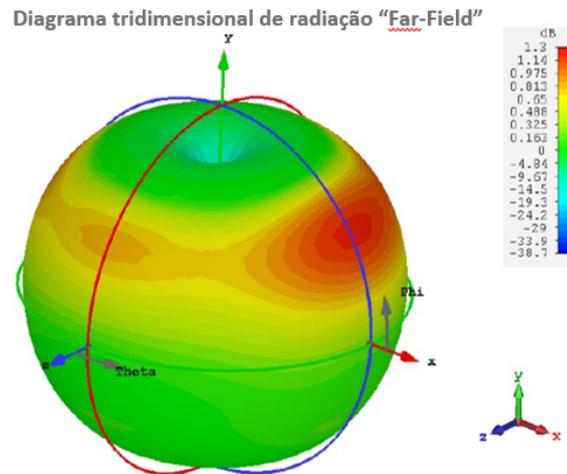
Fonte: HOPE Microelectronics CO. (2018).

Juntamente ao transceptor está uma antena, representada pela Figura 14. Trata-se de uma antena do tipo Monopolo, revestida por uma fórmula própria do fabricante de galvanoplastia com cobre, níquel-cromo e ouro, possuindo um intervalo de frequência de operação de 902 a 928 MHz e ganho de 5,1 dBi. O diagrama de radiação da antena dado pelo fabricante é apresentado na Figura 15, tratando-se então de uma antena omnidirecional.

Figura 14 – Antena Monopolo OEM 5.1dBi 915Mhz PCB, marca C-3PO Tecnologia.

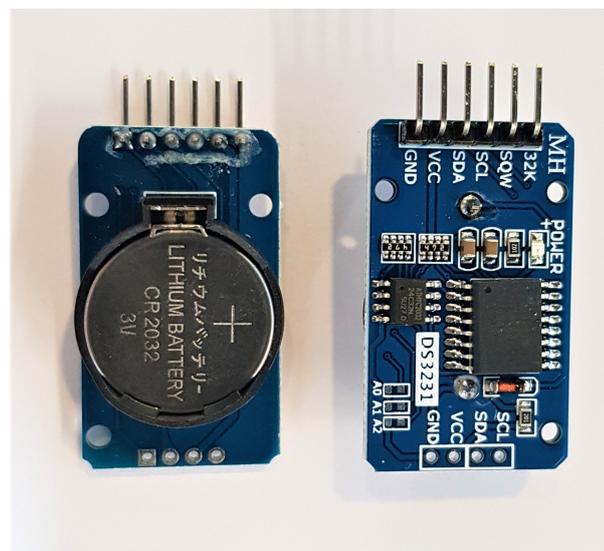


Fonte: C-3PO Tecnologia (2018).

Figura 15 – Diagrama de radiação de campo distante.

Fonte: C-3PO Tecnologia (2018).

- 2 Módulo RTC DS3231: o módulo RTC DS3231 é um relógio de tempo real, de alta precisão e de baixo consumo de energia. É capaz de fornecer informações como segundos, minutos, dias, meses e anos. Correções como meses com menos de 31 dias e anos bissextos são realizadas automaticamente e em caso de falha de energia, o DS3231 aciona automaticamente a bateria que acompanha ao módulo para evitar perda de dados. Utiliza o protocolo de comunicação I2C. A Figura 16 apresenta o módulo DS3221, juntamente de sua bateria.

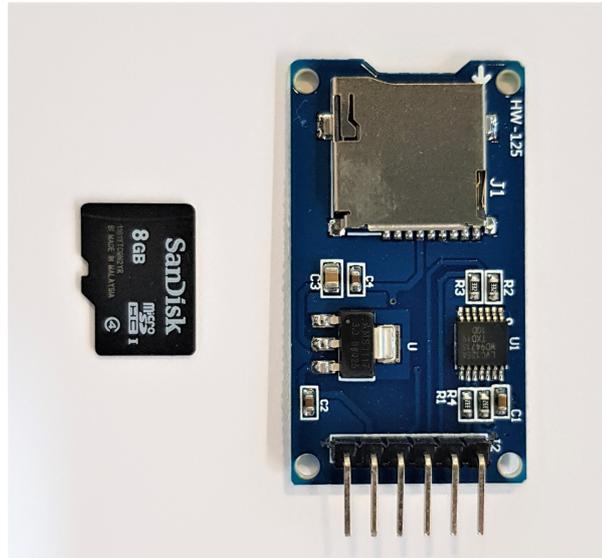
Figura 16 – Módulo RTC DS3231.

Fonte: o Autor (2022).

- 3 Adaptador de Cartão de Memória: trata-se de um módulo que possui integrado um leitor de cartão de memória *Micro SD*, o qual se comunica através do sistema de arquivos e do microcontrolador utilizando-se do protocolo SPI. Foi utilizado um cartão de memória de

8 Gb de memória da marca SanDisk nos testes. Os elementos são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Módulo adaptador de cartão de memória.



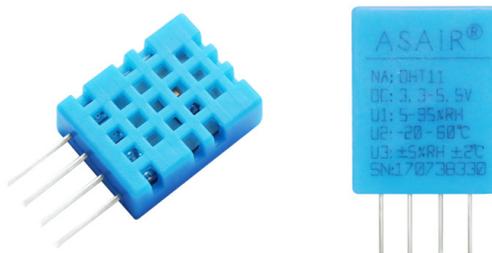
Fonte: o Autor (2022).

- 4 Módulo Microcontrolador DOIT ESP32-Wroom 32u e Antena Wifi 2.4 GHz: este módulo microcontrolador conta com um microprocessador Xtensa de 32-Bits LX6, *Dual Core*, que apresenta baixo consumo de energia, com conectividade *Wifi* e *Bluetooth*. Disponibiliza as seguintes interfaces para comunicação: UART, SPI, SDIO, I2C (Inter-Integrated Circuit), I2S, IR e PWM. A Figura 18 mostra a antena à esquerda e o módulo microcontrolador à direita. O fato do módulo possuir conexão com a Internet embutida via *Wifi* torna o microcontrolador uma ótima opção para IoT, assim como sua capacidade de se comunicar com múltiplas interfaces, em especial, SPI e I2C, acaba por permitir a utilização de uma vasta gama de circuitos integrados ADC. Dessa forma, é possível utilizar sensores com saídas digitais comerciais que possuam a mesma interface de comunicação e, principalmente, a utilização de sensores de desenvolvimento próprios. A antena utilizada permite a recepção de sinal de Internet Wifi na frequência de 2.4 GHz.
- 5 Sensor de Temperatura e Umidade DHT11: como o próprio nome sugere, o DHT11 é utilizado para medir a temperatura (de 20 a 60 °C com acurácia de 1°C, para mais ou para menos) e a umidade relativa do ar (de 5 a 95 % com acurácia de 5 %, para mais ou menos). Este sensor foi utilizado como exemplo de sensor com saída digital, medindo uma grandeza relevante para o âmbito da geotecnia. A Figura 19 apresenta o sensor utilizado.

É importante salientar que a opção do emprego do sensor de temperatura e humidade nos testes foi devido a importância que essas grandezas representam em estudos geotécnicos, além do fato de que a utilização do mesmo (DHT11), era mais conveniente a prototipação dos

Figura 18 – Módulo Microcontrolador DOIT ESP32-Wroom 32u e antena Wifi 2.4 GHz.

Fonte: o Autor (2022).

Figura 19 – Sensor de Temperatura DHT11.

Fonte: Guangzhou Aosong Electronic Co. (2022).

equipamentos. Porém, outros sensores comumente encontrados em monitoramentos geotécnicos poderiam ter sido utilizados, como: piezômetros, inclinômetros, sensores de nível d'água, células de pressão, células de carga, sensores de deslocamento linear, etc.

Após a finalização da montagem dos equipamentos, se iniciou a etapa de desenvolvimento dos *softwares* dos mesmos. Para isso, foi utilizado o ambiente de programação aberto do Arduino, adaptando-o a programação dos microcontroladores ESP32 utilizados neste trabalho. Foram empregadas as bibliotecas padrão do ambiente para realizar a programação dos módulos com interfaces de comunicação I2C e SPI, além da utilização de um servidor NPT, ou “Protocolo de Tempo para Redes” (do Inglês, *Network Time Protocol*), com a finalidade de manter os dados sincronizados com a data e hora mundial para a criação de gráficos em uma página *web* criada para o teste urbano, a qual será melhor apresentada na seção seguinte.

O fluxo programado de atuação do equipamento transmissor seguia a seguinte ordem:

1. Aquisição dos dados do sensor DHT11 e alocação em variável juntamente com os dados de data e hora do RTC;

2. Impressão dos dados adquiridos através da porta *serial* do microcontrolador para controle do estado do equipamento;
3. Gravação dos dados localmente através do cartão de memória;
4. Envio do pacote de dados através da tecnologia LoRa.

Sendo que se caso houvesse alguma falha de aquisição dos dados do sensor ou algum erro nas leituras, o *software* apenas aguardava o momento de início do próximo ciclo e realizava uma nova tentativa. Simultaneamente, o equipamento receptor permanecia em tempo integral aguardando um pacote de dados e, assim que o recebia, fazia a impressão destes através da porta *serial* do microcontrolador para controle do estado do equipamento e da integridade dos dados e, para o caso em que houvesse conexão com a Internet, aguardava a requisição de dados da página *web* desenvolvida até o momento de recepção de um novo pacote.

3.2 TESTES REALIZADOS

Para a realização dos testes foram selecionadas duas localidades que atendessem às possíveis situações encontradas em campo ao se implantarem projetos de monitoramento geotécnico, e para os quais a inclusão da tecnologia LoRa trouxesse os benefícios esperados. Em áreas rurais ou de campo aberto, é comum a inexistência ou a pobre existência de sinal de Internet e os sensores e seus sistemas registradores ou transmissores de dados necessitam de alimentação exclusiva através de baterias. São, normalmente, os casos de monitoramento de minas, encostas, barragens, rodovias e ferrovias, onde ocorrem os casos em que o acesso aos locais costuma ser bastante difícil, burocrático e perigoso. Em áreas urbanas, geralmente, se tem fácil acesso à conexão de Internet e a energia elétrica. Nesses locais, além da possibilidade dos mesmos casos de monitoramento das áreas rurais (porém menos comuns), costumam fazer parte os monitoramentos de construções (casas, prédios, habitações), ruas, viadutos, aterros e escavações. Para ambos os casos se buscou aplicar os testes de comunicação para distâncias superiores a 300 m, pois estas são capazes de atender a maioria dos casos de monitoramento acompanhados pela FGS.

Durante os testes foram monitorados e salvos os dados recebidos através de um *software* monitor *Serial* presente em um computador conectado ao rádio receptor. Esses dados, dependentes da eficácia da comunicação LoRa, serviram como comparativos com os dados salvos localmente através do cartão de memória para ambos os testes. Um exemplo dos pacotes de dados enviados é mostrado na Figura 20, nos quais percebe-se que os dados em si eram iniciados pelo número do pacote e após eram enviados o valor da temperatura, da umidade e por fim o valor do RSSI (ou, indicador de intensidade do sinal recebido). Os caracteres especiais entre os valores são usados para facilitar o tratamento pela página *web*, e os textos que antecedem cada pacote de dados lidos são apenas impressos através da comunicação *Serial*, e não enviados pela tecnologia LoRa.

Figura 20 – Exemplo de pacotes de dados utilizados nos testes.

```
Lora packet received: 25/28.10&80.00 with RSSI -90
Lora packet received: 26/28.10&80.00 with RSSI -89
Lora packet received: 27/28.10&80.00 with RSSI -89
Lora packet received: 28/28.10&80.00 with RSSI -90
Lora packet received: 29/28.10&79.00 with RSSI -91
Lora packet received: 30/28.10&79.00 with RSSI -90
Lora packet received: 31/28.20&79.00 with RSSI -88
Lora packet received: 32/28.20&79.00 with RSSI -89
```

Fonte: o Autor (2022).

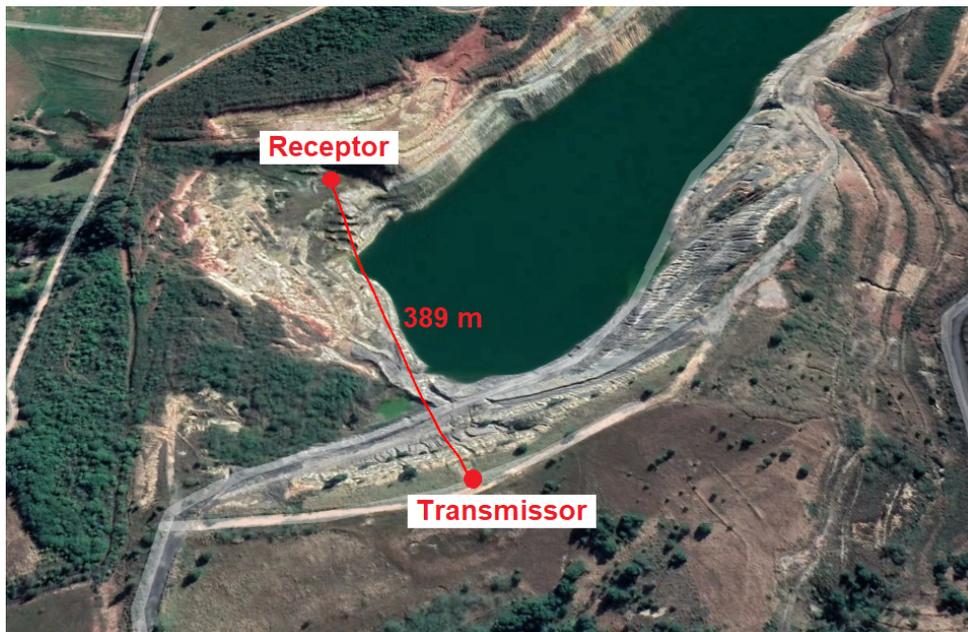
Os rádios transmissor e receptor foram posicionados a uma altura de 1,5 m do solo ou superfície onde se encontravam nos testes, não havendo nenhuma forma de obstrução dos sinais se considerando o caminho direto entre eles.

O primeiro teste realizado aconteceu em uma área rural dentro de uma mina de carvão desativada, localizada na cidade de Minas do Leão, no Estado do Rio Grande do Sul. Este caso foi escolhido para representar um monitoramento de um local sem acesso à Internet, de difícil e trabalhoso acesso, onde a aplicação da tecnologia LoRa pudesse facilitar o acesso aos dados dos sensores sem a presença dos profissionais junto a eles. Trata-se do tipo de caso mais comum dentro dos monitoramentos geotécnicos realizados pela FGS. A Figura 21 mostra uma imagem de satélite do local onde ocorreu o teste, marcando a posição dos rádios e a Figura 22 apresenta um gráfico da configuração da topografia do mesmo. Como mostrado nas figuras, a distância entre os módulos e a diferença de altura perpendicular entre os pontos foram de, aproximadamente, 389 m e 27 m, respectivamente. Foram planejados os envios de 55 leituras do sensor DHT11, sendo uma leitura a cada 20 segundos, de forma que a impressão na porta *Serial* acontecesse imediatamente após a recepção.

Os dados registrados localmente para a temperatura e umidade através do cartão de memória foram usados para gerarem os gráficos apresentados pela Figura 23, enquanto os dados salvos através do monitor *Serial*, dependentes da comunicação LoRa, tem seus gráficos apresentados na Figura 24.

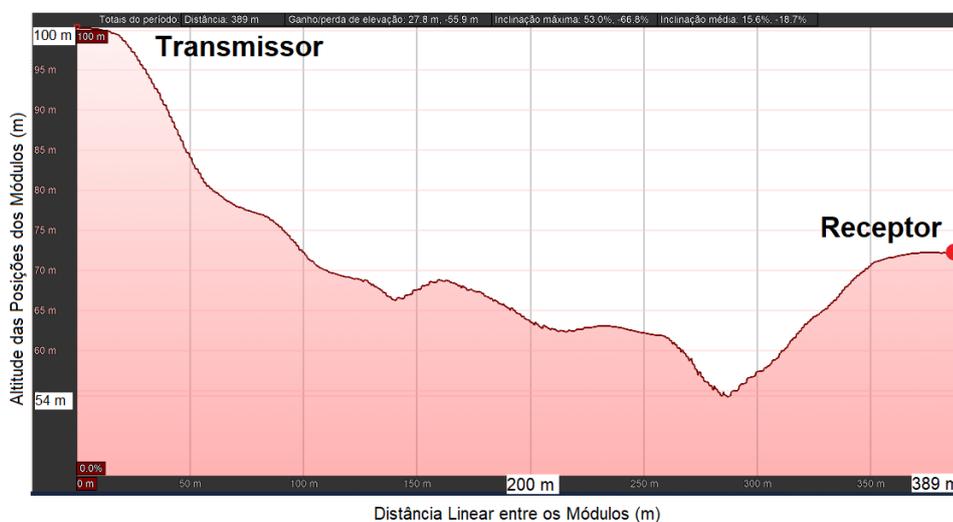
Como se percebe pela comparação entre os gráficos gerados, a comunicação LoRa não foi eficaz para o envio de 4 pacotes de dados nesta área rural. Os valores de RSSI medidos durante o teste estiveram entre os intervalos de -102 dBm a -96 dBm, o que, considerando a capacidade de recepção dos transceptores LoRa utilizados, estaria ainda bem acima do valor mínimo de sensibilidade (-147 dBm). A aplicação da Equação 2 gera o valor de 5,65 m para o maior raio do elipsoide de Fresnel. Como pode ser observado na 22 e pela dada diferença de altitude entre os posicionamentos dos rádios, além do posicionamento 1,5 m acima do solo, não haveria obstáculo capaz de comprometer mais de 40% da Zona de Fresnel de primeira ordem que pudesse ser utilizado como motivo para a perda dos 4 pacotes de dados ocorrida. Talvez, o fato de os rádios terem sido montados em placas de prototipação, com fios longos, e terem sido aplicados

Figura 21 – Imagem de satélite do local do Teste em Área Rural.



Fonte: adaptado de Google Earth (2022).

Figura 22 – Gráfico de características topográficas do local do Teste em Área Rural.

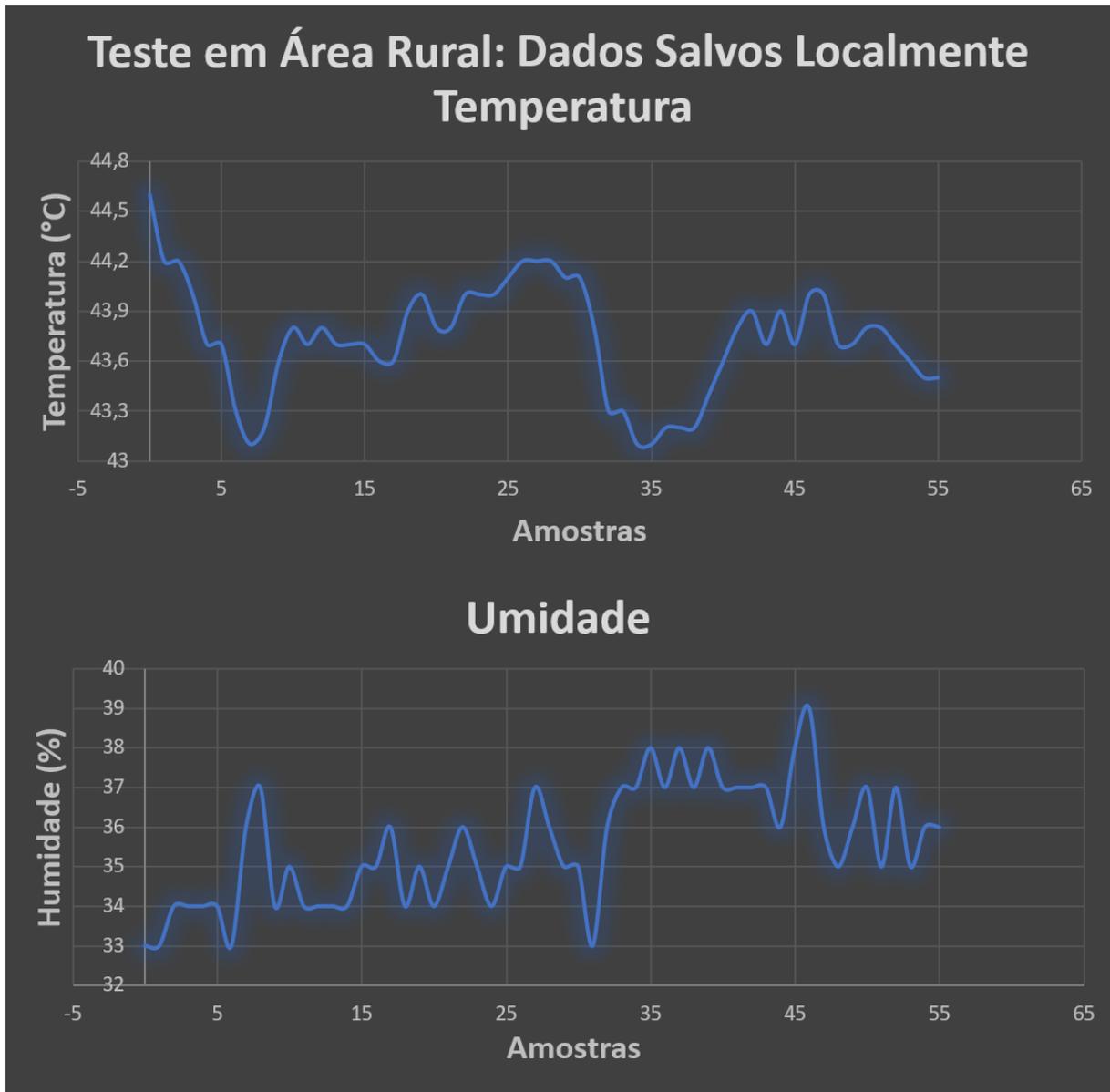


Fonte: adaptado de Google Earth (2022).

sem nenhuma forma de proteção ao ambiente aberto, dessa forma sujeitos à interação do vento forte e partículas de poeira notadas durante o teste, podem ser consideradas as explicações mais plausíveis para o ocorrido.

O segundo teste aconteceu em uma área urbana na localidade de Caxias do Sul, também no Rio Grande do Sul. Este caso representa um monitoramento em local onde se tem fácil acesso à Internet, além de energia elétrica e maior presença de tecnologias que poderiam interferir no sistema. Nesse teste foi possível mostrar a integração da tecnologia LoRa ao conceito IoT. Uma página *Web* de acesso local foi desenvolvida como forma de apresentar os dados do sensor

Figura 23 – Gráficos de temperatura e umidade gerados pelos dados salvos localmente durante teste em área rural.

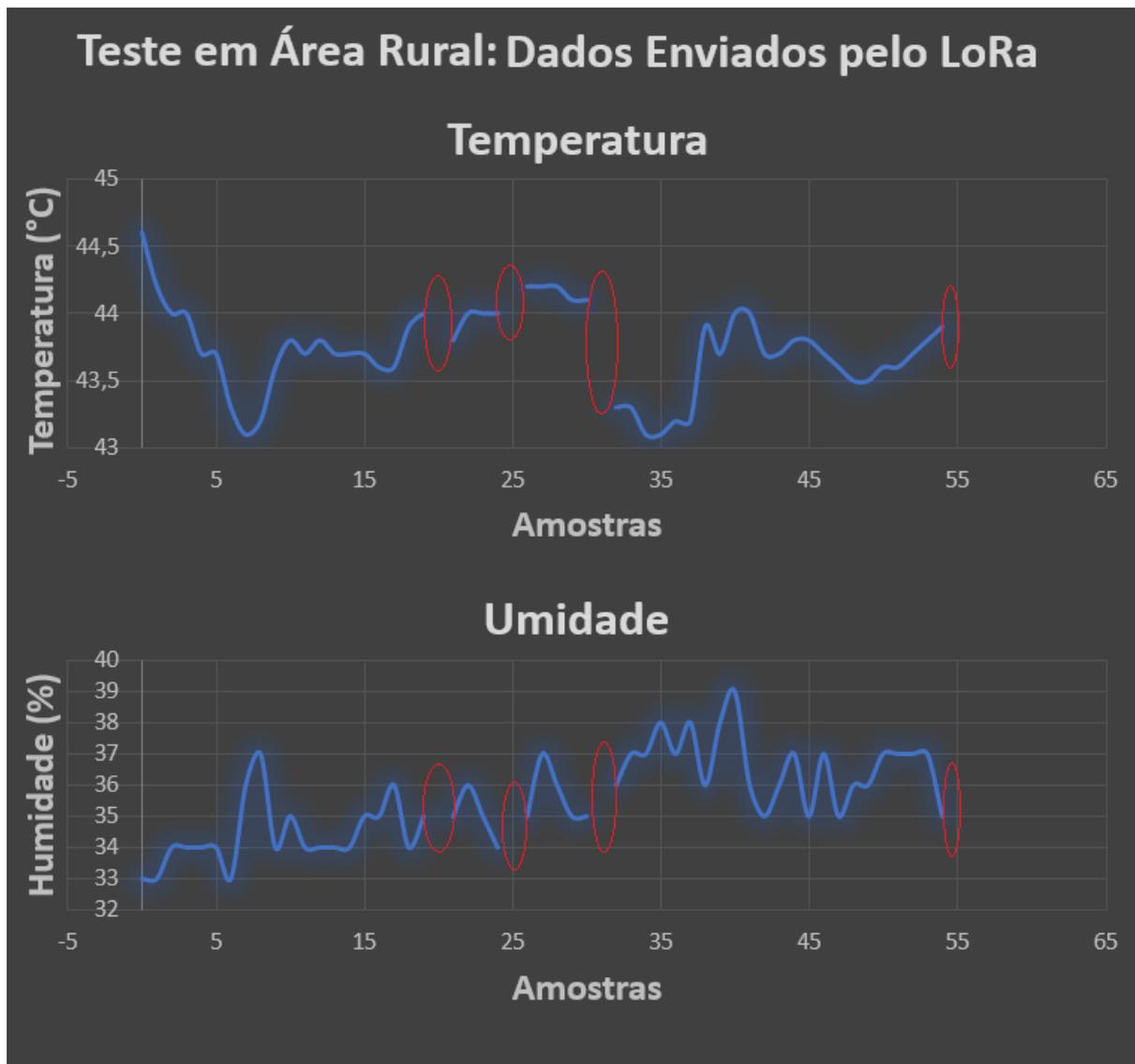


Fonte: o Autor (2022).

DHT11 em tempo real, a qual realizava requisições de novos dados a cada vinte segundos para plotar gráficos de temperatura e umidade. A Figura 25 mostra uma imagem de satélite do local onde foi realizado o teste, marcadas as posições dos rádios, enquanto as características da topografia são apresentadas na Figura 26. Como mostrado nas figuras, a distância entre os módulos e a diferença de altura perpendicular entre os pontos foram de, aproximadamente, 333 m e 33 m, respectivamente.

No Teste em Área Urbana, após se estabelecer a conexão do módulo receptor com a rede de Internet disponível, iniciou-se a recepção dos dados. Por uma questão estética, a página *web* foi reinicializada juntamente com o processo de leitura e envio pelo módulo transmissor, também facilitando a posterior comparação com os dados salvos localmente no Cartão SD e

Figura 24 – Gráficos de temperatura e umidade gerados pelos dados dependentes da comunicação LoRa durante teste em área rural.



Fonte: o Autor (2022).

acompanhamento durante o teste. A Figura 27 apresenta a condição final da página *web* com os gráficos plotados para a temperatura e a umidade no ponto do módulo transmissor. Devido a um erro de programação da página, a plotagem dos dados da umidade se iniciou com um atraso de 12,5 minutos em relação a temperatura, ou seja, dos 100 valores programados para o teste, apenas os 50 últimos foram plotados. Dessa forma, a comparação para os gráficos plotados em tempo real e plotados posteriormente ao teste foram adaptados.

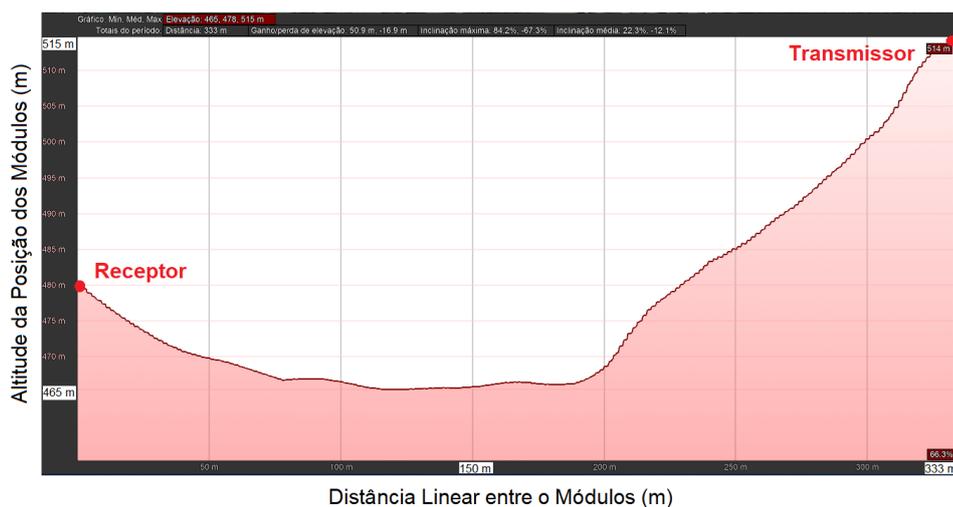
Na Figura 28 está o gráfico de temperatura plotado com os dados salvos localmente. Para uma centena de pacotes de dados enviados, se percebe pela comparação com a Figura 27 que não houve perdas ou discrepâncias entre os dados dependentes do envio e recepção através dos módulos LoRa, isso também se confirmou com a análise dos dados impressos pela porta *Serial* do computador, conectado ao módulo receptor.

Figura 25 – Imagem de satélite do local do Teste em Área Urbana.



Fonte: adaptado de Google Earth (2022).

Figura 26 – Gráfico de características topográficas do local do Teste em Área Rural.



Fonte: adaptado de Google Earth (2022).

A Figura 29 apresenta o gráfico de umidade plotado com os dados salvos no cartão de memória. Para cinquenta pacotes de dados enviados, novamente, se percebe pela figura que não houve perdas ou discrepâncias entre os dados dependentes do envio e recepção através dos módulos LoRa, apresentados na Figura 27, o que mais uma vez se confirmou com a análise dos dados impressos pela porta *Serial*.

O resultado para o maior raio do elipsoide da Zona de Fresnel, obtido através da 2, resulta no valor de 5,22 m. Novamente, a análise da topografia local e da presença de obstruções resulta em uma porção livre maior do que 60%. Como esperado, não houveram falhas na comunicação porém, se tivessem acontecido, seria possível voltar as causas a interferências por outras tecnologias de RF, tanto pelas moradias notadas na região, quanto pelo fato da comunicação ter cruzado uma rodovia extremamente movimentada.

Figura 27 – Página web contendo gráficos de temperatura e umidade gerados sincronamente ao teste em área urbana.

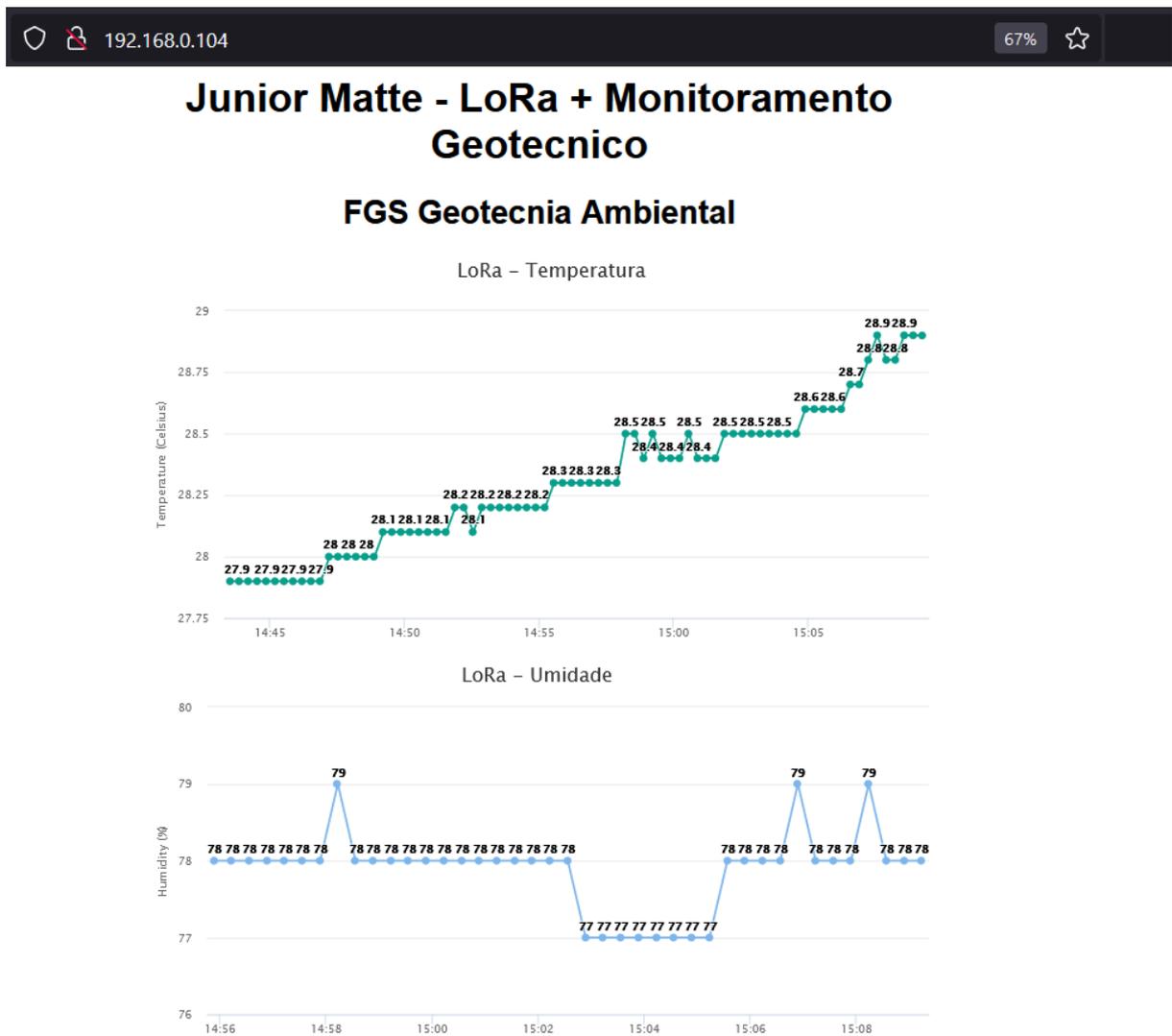
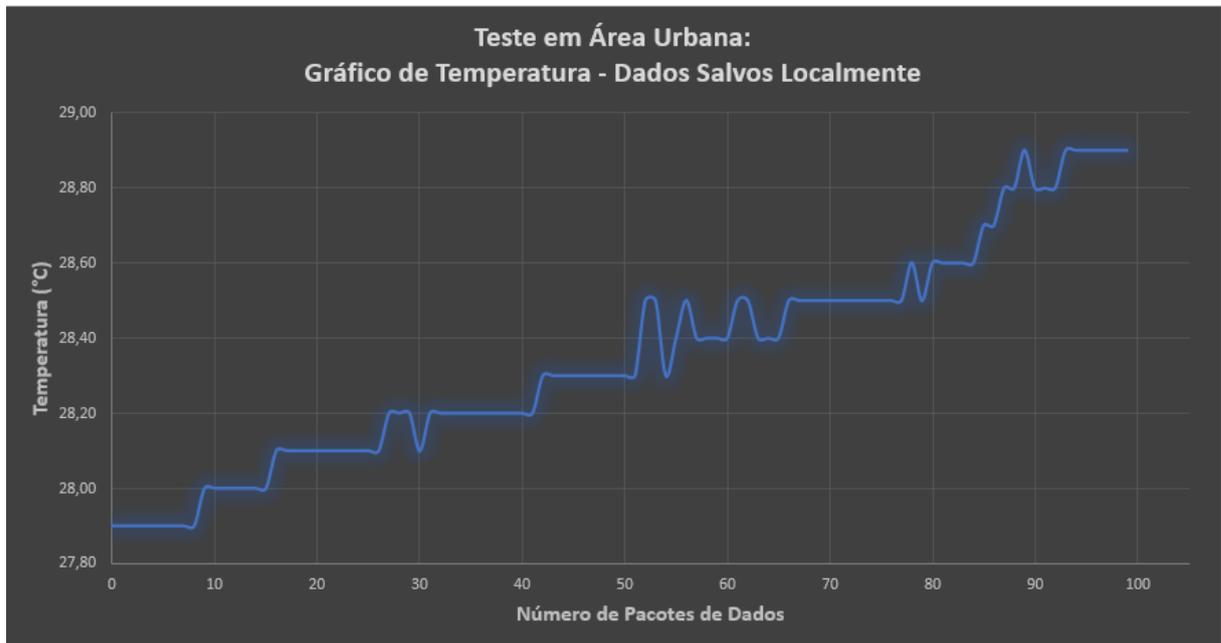
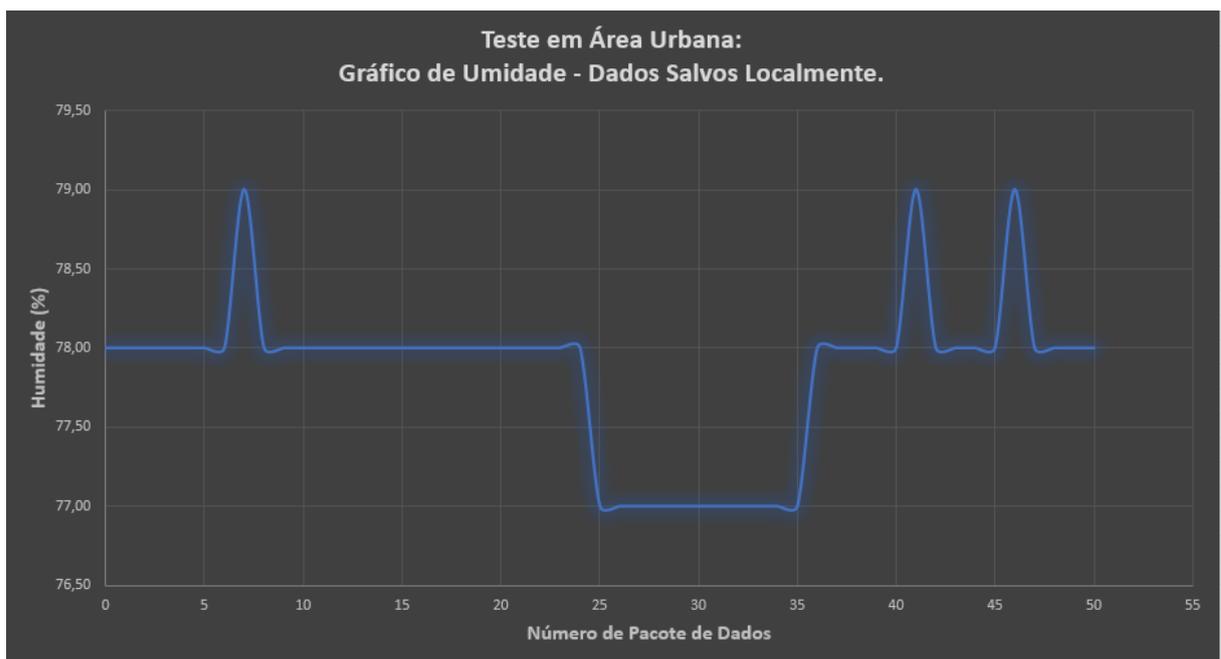


Figura 28 – Gráfico de Temperatura gerado com dados salvos localmente, posteriormente ao teste.

Fonte: o Autor (2022).

Figura 29 – Gráfico de Umidade gerado com dados salvos localmente, posteriormente ao teste.

Fonte: o Autor (2022).

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentada a possibilidade de inserção da tecnologia LoRa ao monitoramento geotécnico com a proposta de facilitar os serviços relacionados a área. Juntamente à modulação e seu protocolo LoRaWan, foram aplicados conhecimentos sobre antenas e propagação de ondas eletromagnéticas e, visando a montagem de um produto capaz de satisfazer as necessidades de monitoramento de forma versátil, barata, segura e adequada, foram utilizados componentes eletrônicos como o RTC e o adaptador de cartão SD. A solução construída ainda foi integrada ao conceito IoT, tendo sido criada uma página *web* que apresentou os dados graficamente em tempo real sem erros.

Após um capítulo dedicado ao embasamento teórico utilizado durante o desenvolvimento do trabalho, foram apresentados dois testes representativos ao âmbito geotécnico, sendo o primeiro executado em uma área rural e o segundo em uma área urbana. Os testes foram capazes de simular as situações mais comumente enfrentadas pela engenharia geotécnica no que diz respeito a projetos necessitados de tratamento e estudo contínuo. Para o caso rural, foi obtido cerca de 92% de aferição no envio e recepção dos dados do sensor, enquanto que para o teste urbano o valor foi de 100%. Considerando que os rádios foram montados sobre placas de prototipação e não tiveram seus componentes protegidos de fatores externos, é possível afirmar que a eficiência da aplicação LoRa para ambos os testes foi basicamente infalível.

Os resultados obtidos durante os testes mostraram que o LoRa é uma ótima opção para a aplicação geotécnica devido, principalmente, a sua capacidade de longo alcance do sinal e da robustez na transferência dos dados. Sua instalação em locais de difícil e perigoso acesso é uma forma de diminuir custos relacionados aos monitoramentos e à exposição constante de profissionais a esses meios. Os rádios LoRa transceptores montados juntamente dos componentes e recursos adicionados, quando comparados com produtos comerciais, é possível afirmar que se tratam de equipamentos mais versáteis devido às suas possibilidades de utilização de sensores de desenvolvimento próprio porém, em comparação com um equipamento como a estação Hobo RX3000, carecem de desenvolvimento de software para posterior tratamento e apresentação dos dados.

Como sequência a este trabalho seria interessante trocar a construção dos equipamentos para placas de circuito impresso, e realizar novamente os testes. Ainda nessa ideia, a utilização de antenas direcionais para conferir a capacidade de alcance da tecnologia, aumentando as distâncias entre os equipamentos gradualmente, seria de grande interesse, principalmente devido às situações onde mesmo para raios superiores a 3 km distantes dos sensores, não é possível encontrar conexão com a Internet, impedindo a integração ao IoT. Além disso, estabelecer uma rede LoRa compostas por um número maior de sensores a se comunicarem com um *gateway* de desenvolvimento próprio, seria uma forma excelente de dar sequência visando casos mais realistas do que apenas um sensor se comunicando ponto-a-ponto, como apresentado.

REFERÊNCIAS

- AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015.
- AL-SARAWI, S. et al. Internet of things (iot) communication protocols: Review. In: **2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 685–690.
- BASSETT, R. **A guide to field instrumentation in geotechnics**. [S.l.]: Great Britain: Spon press, 2012.
- BHAT, O.; GOKHALE, P.; BHAT, S. Introduction to iot. **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology ISO**, 2007.
- CHATELLUS, H. G. D. et al. Reconfigurable photonic generation of broadband chirped waveforms using a single cw laser and low-frequency electronics. **Nature Communications** **2018 9:1**, Nature Publishing Group, v. 9, p. 1–12, 6 2018. ISSN 2041-1723. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41467-018-04822-4>>.
- CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M.; BORKAR, S. Lpwan technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. **Future Internet**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 46, 2020.
- DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engineering**. 5. ed. [S.l.]: Thomson, 2006.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1993.
- HUDSON, D. F. Telecommunications engineer's reference book. In: MAZDA, F. (Ed.). [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1993. p. vii–viii. ISBN 978-0-7506-1162-6.
- IEEE. Ieee standard for definitions of terms for antennas. **IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)**, p. 1–50, 2014.
- KADIR, E. A.; EFENDI, A.; ROSA, S. L. Application of lora wan sensor and iot for environmental monitoring in riau province indonesia. In: **2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 281–285.
- LARGE, D.; FARMER, J. Chapter 6 - linear microwave signal transportation. In: LARGE, D.; FARMER, J. (Ed.). **Broadband Cable Access Networks**. Boston: Morgan Kaufmann, 2009, (The Morgan Kaufmann Series in Networking). p. 161–184. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744012000061>>.
- LATHI, B. P.; DING, Z. **Sistemas de Comunicações Analógicas e Digitais Modernos**. 4. ed. [S.l.]: LTC, 2012.
- Link Labs. **A Comprehensive Look at Low Power, Wide Area Networks**. 2016. Acessado em: 2022-01-14. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>>.
- Link Labs. **Low Power Wide Area Network (LPWA)**. 2018. Acessado em: 2022-01-14. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/low-power-wide-area-network-lpwa>>.

- LINK LABS. **What Is LoRa? A Technical Breakdown | Blog | Link Labs**. 2018. Acessado em: 2022-01-12. Disponível em: <<https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>>.
- LoRa Alliance. **About LoRa Alliance®**. 2019. Acessado em: 2022-01-13. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>>.
- MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. Internet of things (iot): A literature review. **Journal of Computer and Communications**, 2015.
- MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. **ICT Express**, Elsevier, v. 5, p. 1–7, 3 2019. ISSN 2405-9595.
- MROUE, H. et al. Analytical and simulation study for lora modulation. **2018 25th International Conference on Telecommunications, ICT 2018**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 655–659, 9 2018.
- NOVUS. **FieldLogger Manual de Instruções V1.7x A**. Fremont, CA, 2022. 98 p. Acesso em: 02/03/2022.
- ONSET. **HOBO® RX3000 Data Logger**. [S.l.], 2022. 3 p. Acesso em: 02/03/2022.
- PATEL, K. K.; PATEL, S. M. et al. Internet of things-iot: definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges. **International journal of engineering, science and computing**, v. 6, n. 5, 2016.
- PEREIRA, M.; POSTOLACHE, O.; GIRAO, P. Spread spectrum techniques in wireless communication. **IEEE Instrumentation Measurement Magazine**, v. 12, n. 6, p. 21–24, 2009.
- RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio : Princípios e práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- RIBEIRO, J. M. T. **Uma Aplicação da Tecnologia LoRa em um Ambiente Hospitalar**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Eletrônica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.
- SADIKU, M. N. **Elementos de Eletromagnetismo**. [S.l.]: Bookman, 2012.
- SARR, Y.; GUEYE, B.; SARR, C. Performance analysis of a smart street lighting application using lora wan. In: **2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- Semtech Corporation. **What are LoRa® and LoRaWAN®?** 2019. Acessado em: 2022-01-14. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>.
- SHAH, S. H.; YAQOOB, I. A survey: Internet of things (iot) technologies, applications and challenges. In: **2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 381–385.
- STALLINGS, W. **Data and Computer Communications**. 8. ed. Sainte Soulle, France: Pearson, 2007.
- STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. **Teoria e Projeto de Antenas Vol.1**. [S.l.]: LTC, 2017.

TEIXEIRA, G. B.; ALMEIDA, J. V. P. de. **REDE LORA® E PROTOCOLO LORAWAN® APLICADOS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO NO BRASIL**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, Brazil.

The Things Network. **What are LoRa and LoRaWAN? | The Things Network**. 2017. Acessado em: 2022-01-14. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>>.

The Things Network. **Spreading Factors**. 2019. Acessado em: 2022-01-15. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>>.

VIEIRA, M. Influência do lago da uhe tucuruí sobre a barragem de concreto: Um estudo sobre os mtj's. **Revista CIATEC-UPF**, v. 9, p. 1, 06 2017.

WILDAN, F. M.; HAMIDI, E. A. Z.; JUHANA, T. The design of application for smart home base on lora. In: **2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.