



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

VINICIUS GAMA NASCIMENTO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA O
MONITORAMENTO DE CARGAS EM ÁREAS
REMOTAS UTILIZANDO TECNOLOGIA LORA**

Bom Jesus da Lapa–BA
Agosto de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

Vinicius Gama Nascimento

**MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA O MONITORAMENTO
DE CARGAS EM ÁREAS REMOTAS UTILIZANDO TECNOLOGIA
LORA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Brito Santos

Bom Jesus da Lapa–BA
Agosto de 2025

FOLHA DE APROVAÇÃO

VINICIUS GAMA NASCIMENTO

MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA O MONITORAMENTO DE CARGAS EM ÁREAS REMOTAS UTILIZANDO TECNOLOGIA LORA

Trabalho de Conclusão de Curso foi aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 04 de Agosto de 2025

Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira (UFOB)
(Orientadora)

Prof. Dr. Leandro Brito Santos (UFRB)
(Coorientador)

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior (UFOB)

Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento Souza (UFOB)

Prof. Dr. Eduardo Manoel de Freitas Jorge (UNEB)

*Em especial aos meus pais, pilares da minha formação
como ser humano.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus.

A todos os professores.

Aos funcionários do Campus.

Aos amigos e família.

A instituição UFOB.

“No.”

(Nikola Tesla)

Resumo

O monitoramento remoto das condições elétricas de operação de equipamentos em localidades de difícil acesso representa um desafio considerável, pois essas regiões apresentam recursos limitados de conectividade. Além disso, existe um custo associado à manutenção de dispositivos nesse contexto. A supervisão pode contribuir na redução de gastos com manutenções corretivas. Diante desse problema, existem possibilidades de estudos acadêmicos como alternativas para a modelagem e implantação de tecnologias para controle e monitoramento à distância de cargas em áreas remotas. Dentre as opções, é possível utilizar tecnologias de radiofrequência. Neste trabalho, foi escolhida a tecnologia LoRa para modelar o sistema computacional de monitoramento e controle de cargas à distância. Também foi realizada a análise do modelo de Okumura-Hata para avaliar a perda de potência do sinal. Ademais, foram utilizados os indicadores *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) e *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) para mensurar a qualidade e a perda de potência do sinal, a fim de determinar a distância entre os dispositivos que permita a comunicação sem perdas significativas. Nos testes realizados, obteve-se uma distância máxima de 227 metros em ambiente rural, com atenuação de até -100 dBm, e 185 metros em cenário urbano, com atenuação de -107 dBm. Esses resultados demonstraram que é possível aplicar o sistema de monitoramento proposto sob essas condições operacionais.

Palavras-chave: LoRa, monitoramento remoto, IoT, propagação de sinal, Okumura-Hata, Longley-Rice.

Abstract

Remote monitoring of the electrical operating conditions of equipment in hard-to-reach locations presents a considerable challenge, as these regions often have limited connectivity resources. Additionally, there are costs associated with maintaining devices in such contexts. Supervision can help reduce expenses related to corrective maintenance. Given this problem, academic studies offer alternatives for modeling and implementing technologies for remote control and monitoring of loads in remote areas. Among the available options, radio frequency technologies can be used. In this study, LoRa technology was chosen to model the computational system for remote monitoring and control of loads. The Okumura-Hata model was also analyzed to evaluate signal power loss. Furthermore, the indicators Signal-to-Noise Ratio (SNR) and Received Signal Strength Indicator (RSSI) were used to measure signal quality and power loss, in order to determine the maximum distance between devices that allows communication without significant losses. In the tests conducted, a maximum distance of 227 meters was achieved in a rural environment, with attenuation of up to -100 dBm, and 185 meters in an urban scenario, with attenuation of -107 dBm. These results demonstrate that the proposed monitoring system can be applied under these operational conditions.

Keywords: LoRa, remote monitoring, IoT, signal propagation, Okumura-Hata, Longley-Rice..

Lista de Figuras

1	Etapas para o desenvolvimento da metodologia científica	19
2	Ilustração de <i>smart grids</i>	23
3	Poços e Fontes Naturais no Brasil	23
4	Diagrama de bloco das etapas da instrumentacao	25
5	Elementos estruturais basicos de um sistema celular	26
6	Porcentagem da cobertura 4G no estado da Bahia	27
7	Espalhamento Espectral	29
8	Diagrama de blocos SX1262	30
9	Algoritmo do Modelo Longley-Ric	33
10	Diagrama de Blocos Funcional ESP32	34
11	ESP32 DevKit V1 Diagrama	34
12	Percurso metodológico	35
13	<i>End-point LoRa</i>	36
14	Sensor ZMPT101B	36
15	Sensor ACS712	36
16	<i>Gateway LoRa</i>	37
17	Heltec WiFi LoRa 32 (V2)	38
18	Diagrama de ligação	39
19	Diagrama de sequênciia do operação do sistema	39
20	Diagrama de caso de uso	40
21	Fluxograma <i>firmware</i> do transmissor	41
22	Fluxograma <i>firmware</i> do receptor	41
23	Estrutura da aplicação utilizando React e express	42
24	Imagen Aérea da Área de Testes	43
25	Teste ambiente urbano	44
26	Elevação por ponto de teste ambiente urbano	44

27	Modelagem computacional para registrar cargas em áreas remotas	46
28	Poços e Fontes Naturais em Morro do Chapéu	46
29	Aplicação de monitoramento	47
30	Tela de parâmetros do modelo	47
31	Perda de Percurso no Modelo Okumura-Hata em Ambiente Rural	48
32	RSSI, SNR e Modelo de Okumura-Hata em função da distância ambiente rural	49
33	RSSI, SNR e Modelo de Okumura-Hata em função da distância ambiente urbano	49

Lista de Tabelas

4	Parâmetros utilizados para a comunicação LoRa	42
5	Parâmetros Utilizados para o Modelo Okumura-Hata	43
6	Valores de RSSI, SNR, elevação e distância para o ambiente rural	48
7	Valores de RSSI, SNR, elevação e distância para o ambiente urbano	48

Lista de quadros

1	Comparação de Tecnologias de Comunicação	25
2	Módulos de rádio produzidos pela Semtech para nós LoRa	29
3	Classificação dos Modelos de Propagação	31

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BW	<i>bandwidth</i>
CCM	Centro de Comutação Móvel
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
EM	Estação Móvel
ERB	Estação Rádio Base
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LPWANs	<i>Low Power Wide Area Networks</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SF	<i>spreading factor</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>
LPSAN	<i>Low Power Short Area Network</i>

Lista de Símbolos

G	Giga
M	Mega
m	metros
bps	Bits por segundo
k	kilo
Hz	Frequênciā
%	Porcentagem

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	18
1.2 Objetivos	18
1.3 Metodologia	18
1.4 Trabalhos Correlatos	19
1.5 Organização do trabalho de conclusão de curso	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 <i>Smart Grid</i>	22
2.2 Cargas acionadas em áreas remotas	23
2.3 Sistemas de supervisão	24
2.3.1 Transdutores	24
2.4 Redes aplicadas à IOT	25
2.4.1 Redes de Celulares	26
2.4.2 LPSANs	27
2.4.3 LPWANs	28
2.4.4 LoRa	28
2.4.5 Equipamentos LoRa	29
2.4.6 Métricas para análise e cobertura	30
2.5 Modelos de propagação	31
2.5.1 Modelagem matemática do modelo de Okumura-Hata	32
2.5.2 Algoritmo de Longley-Rice	32
2.6 Sistemas Embarcados	33
2.6.1 ESP32	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Modelagem do <i>hardware</i>	36

3.1.1	<i>Gateway LoRa</i>	37
3.1.2	LoRa módulo	37
3.1.3	Montagem do Circuito	38
3.2	Modelagem Computacional do Sistema	38
3.2.1	Modelagem do <i>firmware</i>	40
3.2.2	Modelagem da interface <i>web</i>	42
3.2.3	Parametrização da Simulação	43
3.2.4	Definição dos Locais e Pontos de Teste	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Aplicação desenvolvida	45
4.2	Análise Comparativa	47
4.2.1	Considerações sobre os Desvios e Dificuldades Técnicas	50
5	CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS		55

INTRODUÇÃO

A necessidade de acionar cargas em áreas remotas, onde a presença constante de operadores não é viável, é uma realidade enfrentada principalmente pelo setor agrícola, bombas para o abastecimento de reservatórios, que muitas das vezes estão a quilômetros da localidade do operador. Nesse contexto, o presente trabalho aborda a implementação de sistemas monitoramento e supervisão para cargas em áreas remotas.

O monitoramento contínuo das condições operacionais de um equipamento é possível pelos sistemas de supervisão de equipamentos elétricos, que normalmente são conhecidos como *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA). Essa supervisão evita paradas não programadas, pois evitam possíveis falhas. Indústrias, subestações, hidrelétricas e usinas fotovoltaicas são exemplos aplicações deste sistema. O modelo SCADA tradicional é composto por sensores, atuadores, redes de comunicação, *software* de supervisão e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) (SANTOS, 2014).

A implementação de redes e o monitoramento de cargas em regiões distantes, como comunidades rurais ou localidades remotas, representa um obstáculo considerável. Os principais desafios para a implementação de soluções *Industrial Internet of Things* (IIoT) sustentáveis e econômicas são: (i) custos de gestão da rede; (ii) escalabilidade e organização da rede; (iii) dimensionamento e eficiência energética dos nós de borda; e (iv) cobertura. O acionamento de cargas em locais remotos é uma prática comum, especialmente na agricultura. Exemplos dessa aplicação incluem a operação de bombas de poços artesianos, frequentemente localizadas em áreas distantes de centros urbanos (SANCHEZ-IBORRA, 2016).

Segundo dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (2024) o Brasil registra um total de 371.242 poços e fontes naturais. Esses cenários são caracterizados por uma

infraestrutura elétrica precária e dificuldades de acesso devido ao relevo.

Nesse sentido, é necessário um conjunto de recursos e equipamentos para o monitoramento e acionamento dessas cargas de forma remota. Para isso, podem ser utilizados recursos que empregam sistemas cabeados com fibra óptica. No entanto, o alto custo de infraestrutura pode tornar inviável a implementação de comunicação por meios físicos (MILANEZ et al., 2020).

Isso ocorre porque muitos desses dispositivos de potência que precisam ser acionados remotamente estão localizados em sítios, chácaras ou fazendas, que são áreas dentro da zona rural, mata fechada ou na beira de rios. Uma alternativa é a comunicação via satélite que conta com uma cobertura em todo o Brasil. Este modelo vem sendo largamente utilizado para áreas remotas, porém há um custo elevado de equipamentos, manutenção e mensalidade, o que encarece e inviabiliza sua utilização para projetos de baixo custo.

Outra opção é o modelo de radiofrequência, baseado em uma arquitetura de transmissor e receptor, que, comparado às demais alternativas, é um modelo de baixo custo.

No contexto de redes de radiofrequência para longas distâncias, as *Low Power Wide Area Networks* (LPWANs) emergem como soluções promissoras para aplicações *Internet of Things* (IoT) em cenários onde as soluções tradicionais não sejam viáveis. As LPWANs, incluindo tecnologias como *Long Range* (LoRa), são conhecidas por sua eficiência energética, baixo consumo de energia e capacidade de fornecer cobertura extensa (RECK, 2024).

Utilizando a radiofrequência é possível montar um conjunto de recursos, para monitoramento de equipamentos elétricos de potência em áreas remotas sem depender de um grande investimento, para realizar o acionamento utilizando da radiofrequência é gerado um sinal pelo emissor carregando as informações em uma estrutura de dados que irá trafegar de um ponto a outro, e ao ser recepcionado no local remoto é interpretado pelo algoritmo para que possa acionar a carga, dispositivo ou bomba elétrica. Outro detalhe importante neste modelo é que o dispositivo tem baixíssimo consumo energético, que pode ser alimentado por um painel fotovoltaico e uma bateria para armazenamento de energia. Essa combinação permite que o dispositivo funcione de forma autônoma, mesmo em locais remotos ou com acesso limitado à rede elétrica.

Com esse modelo viável, é possível acionar e monitorar equipamentos elétricos em localidades de difícil acesso. Além disso, é viável criar uma malha de sensores e equipamentos que estejam distantes entre si, formando uma rede de controle e automação. Essa configuração permite o alcance de maiores distâncias, pois cada dispositivo atua como um nó intermediário, encaminhando dados para outros nós.

Diante desse contexto, este trabalho propõe a utilização da tecnologia de rede LoRa para o acionamento de bombas a longas distâncias e possibilitar a inspeção em

tempo real das grandezas elétricas através de um *software* supervisório. Essa abordagem tem como objetivo simplificar as operações de acionamento e reduzir os custos associados aos deslocamentos físicos dos operadores.

1.1 Justificativa

A implementação de sistemas baseados em Internet das Coisas configura-se como uma alternativa viável para o monitoramento de cargas elétricas em áreas remotas, onde há restrição de acesso à infraestrutura de rede convencional. A utilização de tecnologias de radiofrequência, como o protocolo LoRa, permite o controle remoto dos dispositivos sem a necessidade de deslocamentos físicos frequentes. Nesse contexto, além de otimizar a eficiência operacional, reduzir custos com manutenção e aumentar a segurança dos operadores, sistemas supervisórios possibilitam o monitoramento em tempo real e intervenções imediatas diante de falhas, contribuindo para maior confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

1.2 Objetivos

Propor a utilização da tecnologia LoRa para o acionamento e monitoramento remoto de bombas em áreas distantes, com o intuito de simplificar operações e minimizar custos e riscos decorrentes de deslocamentos físicos de operadores;

- Realizar a modelagem computacional do sistema supervisório de monitoramento remoto;
- Desenvolver a modelagem computacional do sistema embarcado;
- Aplicar os indicadores *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) e *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) na análise da qualidade do sinal de comunicação.

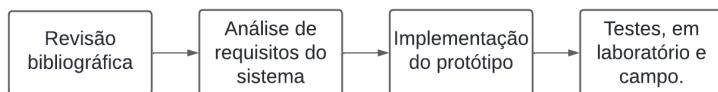
1.3 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é baseada em uma abordagem experimental, visando dividir o projeto nas etapas apresentadas na Figura 1. *A priori*, busca-se compreender o panorama atual do tema estudado, identificar tecnologias relacionadas, metodologias já aplicadas em contextos similares e compreender os principais desafios envolvidos. Com base nesse levantamento, na fase seguinte, define-se de forma objetiva o

que o sistema precisa atender. Portanto, realiza-se a análise de requisitos do sistema, descrevendo as funcionalidades, restrições e características técnicas que ele deve contemplar.

Na sequência, realiza-se a implementação e os testes, buscando atender aos requisitos e funcionalidades descritos. Os testes têm como objetivo validar o sistema, identificar pontos de melhoria e garantir que a solução construída esteja funcional.

Figura 1 – Etapas para o desenvolvimento da metodologia científica



Fonte: Autoria própria

1.4 Trabalhos Correlatos

Na revisão bibliográfica, vários estudos foram explorados para fundamentar o desenvolvimento deste trabalho. Aghenta (2019) desenvolveu um sistema SCADA de código aberto e baixo custo. Este sistema foi projetado para o monitoramento remoto, controle e supervisão de sensores de tensão e corrente conectados a um sistema fotovoltaico. Os dados coletados eram processados e disponibilizados para supervisão e controle através da plataforma *Thinger.IO*, demonstrando a viabilidade de soluções SCADA acessíveis e eficientes para o monitoramento de sistemas fotovoltaicos.

Kuo Wei-Ling Wen (2021) focou em um sistema de *IoT* baseado em LoRa, especificamente desenvolvido para o monitoramento agrícola e controle de bombeamento em campos de bambu. O sistema *IoT* criado por Wen incluía a implementação de unidades *IoT* remotas, responsáveis pela coleta e transmissão de dados, e servidores para a comunicação bidirecional entre o campo e o servidor (*backend*). O estudo demonstrou com sucesso a instalação e operação das unidades *IoT* no campo, contribuindo para a eficiência no gerenciamento de recursos agrícolas.

De acordo com Anwar Md. Rifat Hazari (2021) foi projetado um sistema de controle que permite o monitoramento de parâmetros essenciais na distribuição de potência e o gerenciamento de interrupções por meio da detecção de falhas baseadas em variações de tensão, frequência e corrente. Durante a avaliação, o protótipo foi submetido a testes com cargas de luz incandescente de 60 W, 100 W e 200 W, e a saída resultante foi monitorada sob quatro condições operacionais distintas. O sistema desenvolvido demonstrou ser capaz de detectar falhas, enviar alertas via SMS e realizar o monitoramento remoto dos dados, oferecendo uma solução eficaz para o gerenciamento e controle de distribuição de potência em tempo real.

Ahmed Jose Luis Gallardo (2022) realizou um estudo em que foi projetada e implementada uma plataforma *IoT* baseada na tecnologia LoRaWAN, voltada para o monitoramento remoto de sensores e atuadores em fazendas. Essa plataforma permite a comunicação contínua entre múltiplos dispositivos *IoT*, coletando dados que ajudam na melhoria da tomada de decisões e na validação de algoritmos de predição. A solução foi concebida para proporcionar acesso a dados em tempo real, sendo particularmente útil no rastreamento das atividades laborais de pessoas e máquinas durante a colheita, além de medir uma variedade de parâmetros ambientais e do solo. Os resultados, obtidos por meio de simulações e validações experimentais, demonstraram que a plataforma não só é eficaz, mas também oferece uma solução de baixo custo para a gestão de atividades agrícolas, garantindo assim a eficiência operacional e a precisão na tomada de decisões.

No estudo de Maharaj Vipin Balyan (2022), foi desenvolvido um dispositivo *IIoT* que utiliza a camada física do LoRa para ampliar o alcance da conectividade de sensores em sistemas de controle de processos. Este dispositivo aprimorou a interoperabilidade de dados entre sistemas legados de controle de processos e novos sistemas de *IIoT*, oferecendo uma solução prática e eficaz para o monitoramento e controle em plantas de tratamento de água residual. A implementação prática demonstrou o potencial da tecnologia LoRa em ambientes industriais, especialmente em termos de alcance e confiabilidade da comunicação.

Torres Denys Cezar Cabral (2023) realizou a implementação prática de um sistema de monitoramento de longa distância utilizando o ESP32 LoRa na agricultura de precisão. O estudo integrou sensores de temperatura e umidade para criar um sistema de irrigação automatizada, que foi testado em zonas urbanas. A comunicação entre os sensores e o sistema de controle foi eficaz, sem perda de dados, mostrando que a tecnologia LoRa pode ser aplicada com sucesso em ambientes urbanos para a automação agrícola.

Reck (2024) realizou um estudo comparativo para validar as simulações de cobertura de comunicação via rede LoRa, com o objetivo de avaliar e classificar os melhores modelos de cobertura disponíveis. Além disso, foi desenvolvido um dispositivo de comunicação para medidores eletrônicos, permitindo o corte e religamento remotos de energia, com a implementação desses dispositivos nas unidades consumidoras nas cidades de Tapajara e Ibiaçá. Os testes realizados foram bem-sucedidos, demonstrando a capacidade de comunicação de longo alcance e apresentando métricas positivas do sistema instalado. O estudo identificou o modelo de Beirut como o melhor modelo de cobertura, apresentando o menor Erro Médio Quadrático (RMSE) de 10,52, o que comprova a viabilidade e eficiência da rede LoRa para medição de energia elétrica em áreas urbanas.

1.5 Organização do trabalho de conclusão de curso

Capítulo 1 – Apresenta-se a introdução do trabalho, contextualizando o tema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa e trabalhos correlatos.

Capítulo 2 – Discute-se a fundamentação teórica do trabalho. Neste capítulo foram apresentados os principais tipos de cargas em áreas remotas, conceitos sobre sistemas supervisórios, comunicação por redes sem fio, sistemas microprocessados e definições fundamentais para a elaboração deste trabalho.

Capítulo 3 – Descrevem-se os materiais e métodos adotados. São detalhadas a metodologia aplicada, a arquitetura do sistema, o processo de montagem, os procedimentos de captura e registro dos dados, bem como a identificação de gargalos e limitações observadas durante a execução.

Capítulo 4 – Apresentam-se os resultados e discussões. Os dados coletados no capítulo anterior são analisados, com exposição dos gráficos gerados, interpretação dos resultados e avaliação do desempenho da solução proposta.

Capítulo 5 – Expõe-se as conclusões sobre o trabalho e apresenta propostas de trabalhos futuros.

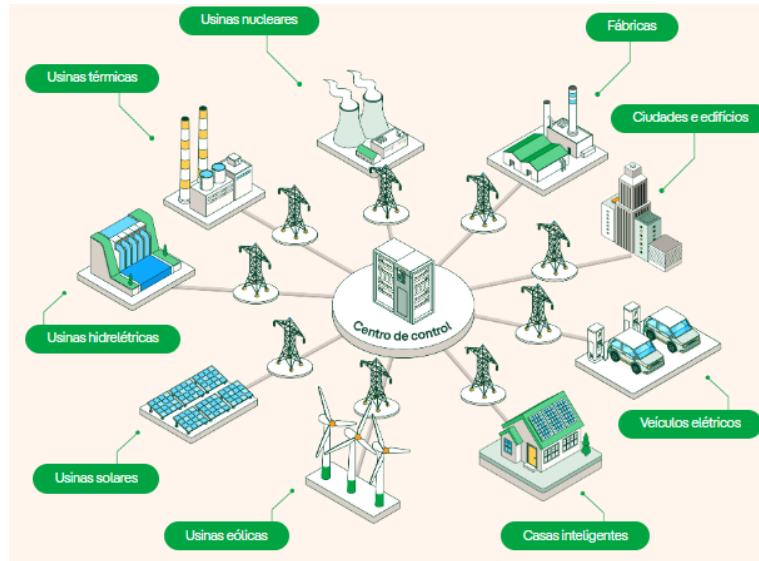
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados de forma objetiva a fundamentação teórica e os conceitos essenciais abordados no curso de Engenharia Elétrica, especificamente nas disciplinas de Máquinas Elétricas, Tópicos Especiais em Engenharia Elétrica: Controle e Automação, Algoritmos e Lógica de Programação e Sistemas Microprocessados. Esses conceitos são fundamentais para a compreensão e definição do presente trabalho.

2.1 *Smart Grid*

Existem sistemas para monitoramento nos 3 setores do sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição). Com objetivo de obter um sistema final mais eficiente tem-se aplicado a tecnologia das *smart grids* também conhecidas como Redes Inteligentes representadas na Figura 2, são sistemas elétricos que integram de maneira inteligente e dinâmica as ações de todos os usuários conectados, sejam eles geradores, consumidores ou ambos, com o objetivo de fornecer eletricidade de forma eficiente, sustentável, econômica e segura. (Iberdrola, 2024).

No Brasil, os principais motivadores para a implantação de *Smart Grids* são a eficiência energética, a confiabilidade do sistema elétrico e a segurança operacional. O desenvolvimento dessas redes depende de iniciativas públicas e privadas, como os incentivos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A primeira iniciativa envolve a modernização da infraestrutura para permitir comunicação bidirecional entre sensores e atuadores, possibilitando assim leituras remotas e contínuas dos dados operacionais. (LEITE; CRUZ, 2017).

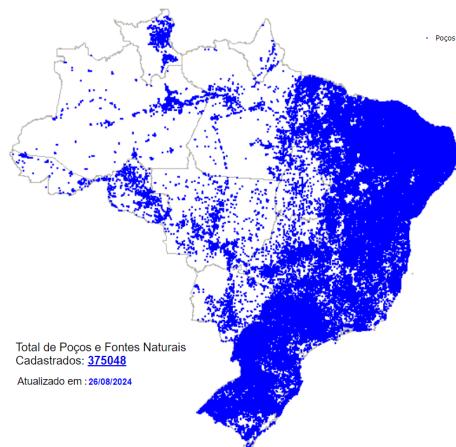
Figura 2 – Ilustração de *smart grids*

Fonte: (Iberdrola, 2024)

2.2 Cargas acionadas em áreas remotas

O interior do nordeste é marcado por um clima semiárido, caracterizado por ausência, escassez, quantidade limitada e pela distribuição irregular das precipitações pluviométricas, associadas a elevadas taxas de evaporação. Com essas condições climáticas, os poços artesianos emergem como uma fonte vital de água para as comunidades locais e para as atividades econômicas (SILVA, 2017).

Essa região enfrenta desafios constantes relacionados à disponibilidade hídrica. Estes poços caracterizam a maior parte das cargas elétricas de potência em localidades de difícil acesso.

Figura 3 – Poços e Fontes Naturais no Brasil

Fonte: Adaptado de (Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2024)

De acordo com Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (2024), a região Nordeste lidera com o maior número de poços, totalizando 206.044, seguida pelas regiões Sudeste e Sul, que possuem 64.678 e 58.366 poços, respectivamente. Em contraste, as regiões Norte e Centro-oeste apresentam números significativamente menores, com 31.761 e 14.199 poços. A distribuição desses dados pode ser visualizada na Figura 3.

2.3 Sistemas de supervisão

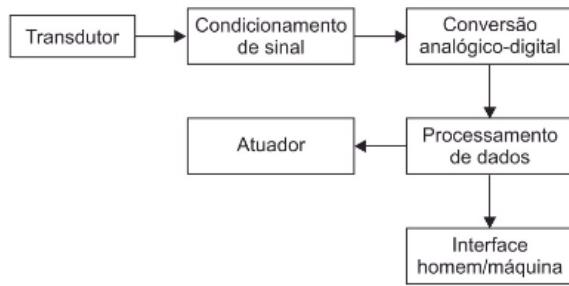
De acordo com Gausshell (1987) apesar de patentes para controle remoto e indicação remota serem registradas desde a década de 1890 a expressão "Supervisório Controle e Aquisição de Dados" ou SCADA, emergem com a utilização dos minicomputadores na década de 1960, esses possibilitaram um aumento enorme na aquisição de dados. Os sistemas supervisórios modernos são adaptados para atenderem necessidades as específicas para atender a vasta faixa de aplicação desde robustas subestações elétricas até simples sistemas de acionamento de cargas isoladas.

Ainda segundo Gausshell (1987) certas funções são básicas para sistemas SCADA. As funções mais comuns incluem:

- Aquisição de dados;
- Exibição de informações;
- Controle e supervisão;
- Processamento de alarme;
- Armazenamento de informações e relatórios;
- Aquisição de Sequência de Eventos;
- Processamento RTU.

2.3.1 Transdutores

Para monitoramento de carga elétricas é fundamental conhecer dados de tensão e corrente, estes podem ser obtidos por meio de transdutores. De acordo com função dos transdutores e tornar possíveis as medidas advindas dos sensores. A instrumentação digital consiste em uma sistemática ordem de etapas apresentada na Figura 4, em que o sinal proveniente do transdutor passa por uma etapa de condicionamento sinais para que os valores das grandezas físicas sejam convertidos para em níveis de tensão requeridos e aceitáveis na leitura(RAMOS, 2012).

Figura 4 – Diagrama de bloco das etapas da instrumentação

Fonte: (RAMOS, 2012)

2.4 Redes aplicadas à IOT

Segundo Rochol (2018), o canal físico de radiofrequência é uma porção limitada do espectro de frequências que, em sistemas sem fio, está localizada na faixa de radiofrequência, dentro do espectro eletromagnético, que se estende até 300 GHz.

Cada canal é caracterizado por uma frequência central e uma largura de banda específica, que determinam sua capacidade de transmitir dados. Esses canais são utilizados para a operação de dispositivos de comunicação, como rádios, televisores, telefones celulares e redes Wi-Fi. O Quadro 1 faz uma comparação das principais tecnologias de comunicação por rádio freqüências, avaliando o consumo energético, alcance e a taxa de transmissão de dados.

Quadro 1 – Comparaçāo de Tecnologias de Comunicação

Tecnologia	Alcance (Típico)	Taxa de Transmissão	Frequência	Consumo Energético
BLE	<100 m	125-2000 Mbps	2,4 GHz	Baixo
Zigbee	<100 m	250 kbps	2,4 GHz	Baixo
Wi-Fi	100 m	2-1730 Mbps	2,4 GHz ou 5 GHz	Alto
Sist. Móveis	<200 km	50-300 Mbps	900 1800 1900 2100 MHz	Alto

Continua na próxima página

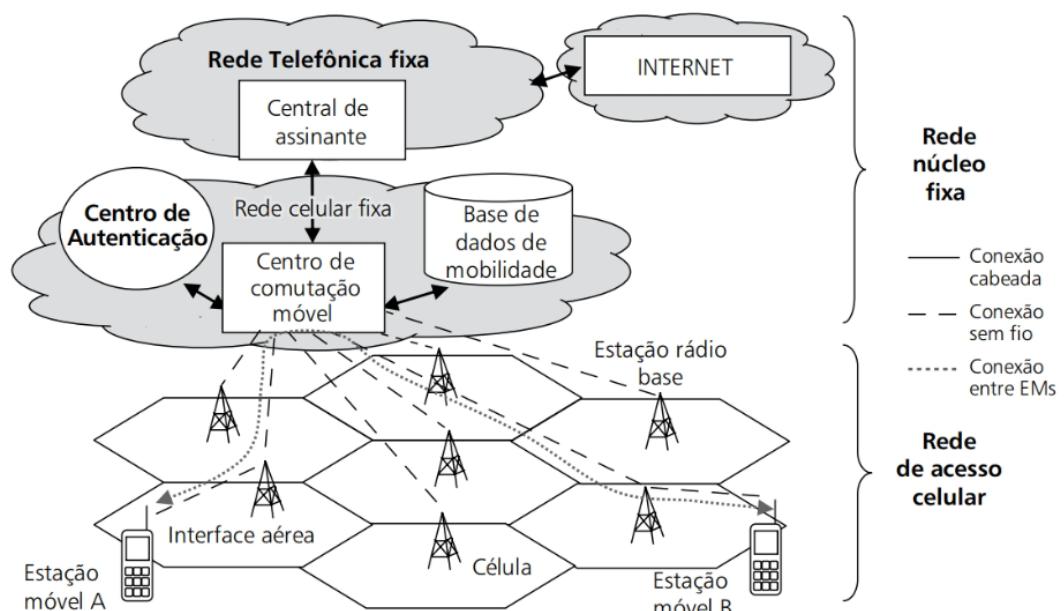
Tecnologia	Alcance (Típico)	Taxa de Transmissão	Frequência	Consumo Energético
LoRa	<15 km	50 kbps	ISM	Baixo
Sigfox	<50 km	100 bps	ISM	Baixo

Fonte: (BRANCO, 2020)

2.4.1 Redes de Celulares

Redes de celulares são infraestruturas complexas que possibilitam a comunicação sem fio entre dispositivos móveis e a internet. De acordo com Rochol (2018), essas redes são compostas por vários componentes essenciais. Quando um usuário, ou Estação Móvel (EM), estabelece uma conexão, ele se comunica com a Estação Rádio Base (ERB) da célula em que se encontra. A ERB, por sua vez, conecta-se ao Centro de Comutação Móvel (CCM), onde são verificadas as informações de autenticidade e mobilidade do usuário, completando assim a conexão.

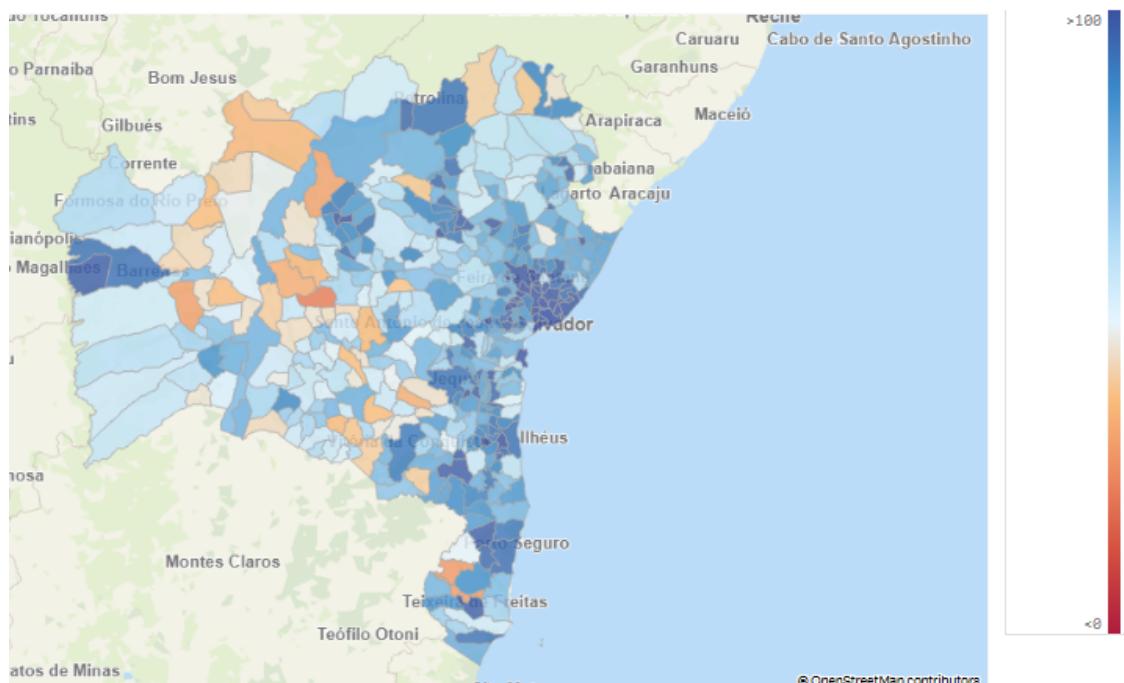
Figura 5 – Elementos estruturais básicos de um sistema celular



Fonte: (ROCHOL, 2018)

A Figura 6, apresenta a porcentagem de cobertura da rede 4G no estado da Bahia considerando todas as operadoras de telefone, é possível observar uma ampla área cobertura, no entanto não atingem toda extensão territorial brasileira (Agência Nacional de Telecomunicações, 2024).

Figura 6 – Porcentagem da cobertura 4G no estado da Bahia



Fonte: (Agência Nacional de Telecomunicações, 2024)

2.4.2 LPSANs

Segundo Silva (2023), as tecnologias categorizadas como *Low Power Short Area Network* (LPSAN) são comumente associadas às *Wireless Sensor Networks* (WSN), que em tradução para a língua portuguesa, corresponde às Redes de Sensores Sem Fio (RSSF).

De acordo com Rochol (2018), uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é composta por pequenos sensores que atuam tanto como geradores quanto como retransmissores de dados, operando de forma colaborativa para monitorar e controlar um ou mais parâmetros físicos em uma área limitada. Esses sensores, distribuídos de forma autônoma, monitoram condições como temperatura, umidade, pressão, luz, movimento, entre outros, e se comunicam entre si, transmitindo os dados coletados para uma estação central ou para a nuvem, onde são processados e analisados.

Dentre as LPSANs, é possível Destacar os protocolos ZigBee, e BLE. A tecnologia ZigBee, implementada pela ZigBee Alliance, é bastante adotada em aplicações domésticas e pessoais de IoT, devido a sua eficiência energética e largura de banda. O protocolo

Bluetooth Low Energy (BLE) foi desenvolvido pelo Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG) (SILVA, 2023)

2.4.3 LPWANs

LPWANs são um tipo de rede sem fio projetada para permitir a comunicação de longa distância com baixo consumo de energia, ideal para dispositivos IoT. As LPWANs oferecem ampla cobertura em áreas extensas, com a capacidade de conectar dispositivos que estão a quilômetros de distância da estação base, ao mesmo tempo em que prolongam a vida útil da bateria dos dispositivos devido ao baixo consumo energético (ZANAJ et al., 2021).

2.4.4 LoRa

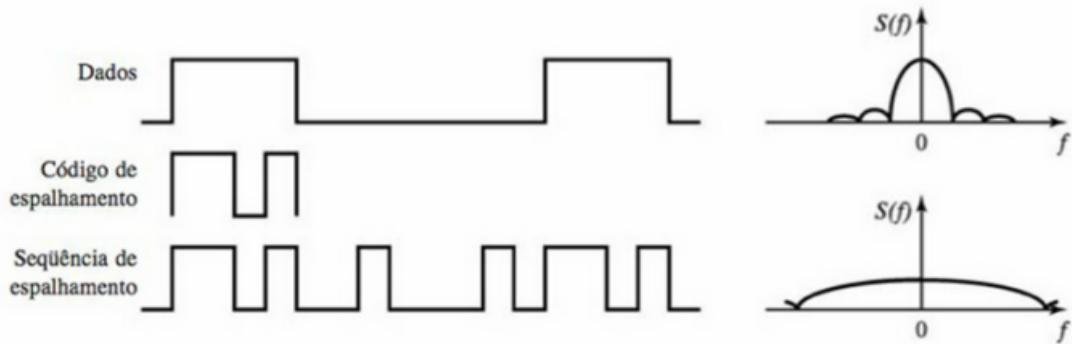
A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) (2017) publicou o ato 14448 regulamentando a tecnologia LoRa no Brasil, definindo o plano de frequência para a América Latina sendo o padrão Australiano de 923 MHz (915 MHz a 928 MHz).

Segundo Reck (2024) o LoRa é uma das tecnologias mais proeminentes dentro das LPWANs, se destaca pelo longo alcance resultante da combinação de uma modulação de baixa taxa de dados denominada CSS com o uso eficiente do espectro de frequência. A estrutura típica das LPWANs se assemelham à das redes celulares, onde uma ou uma série de estações base fornece conectividade direta dos dispositivos de ponta para e depois, para a nuvem, onde os dados são armazenados e preparados para ser acessado.

De acordo com Medeiros (2024), *Spread Spectrum* ou Espalhamento Espectral, representada na Figura 7, é uma técnica de modulação que espalha um sinal ao longo de todo o espectro, fazendo com que o sinal resultante tenha uma largura de banda maior que o sinal original, assim fornecendo ao sistema uma maior imunidade aos ruídos devido o código de espalhamento utilizado na transmissão do sinal.

Segundo Medeiros (2024), na modulação LoRa, os principais fatores para a transmissão de dados no ar (R), é a largura de banda do sinal *bandwidth* (BW), o fator de espalhamento *spreading factor* (SF), que determina o comprimento do código de espalhamento responsável por minimizar o ruído, e a taxa de codificação CR (*coding rate*) utilizada para detecção e correção de erros.

$$R = \left(\frac{BW \times CR}{2^{SF}} \right) \text{ bits/s} \quad (1)$$

Figura 7 – Espalhamento Espectral

Fonte: (MEDEIROS, 2024)

2.4.5 Equipamentos LoRa

No mercado, existem diversos tipos de módulos LoRa disponíveis. O Quadro 2 apresenta os módulos mais utilizados comparando os parâmetros de frequência de operação e potência do sinal emitido.

Quadro 2 – Módulos de rádio produzidos pela Semtech para nós LoRa

Chip	Frequência de Op. (MHz)	Potência do sinal emitido (dBm)
SX1261	150-960	15
SX1262	150-960	22
SX1268	410-810	22
SX1272	860-1020	20
SX1273	860-1020	20
SX1276	137-1020	20
SX1277	137-1020	20

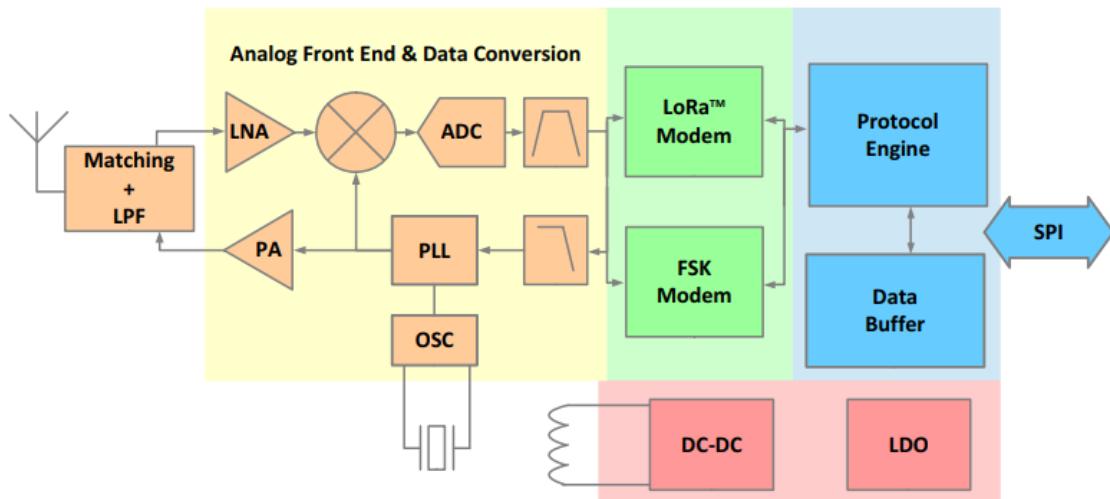
Continua na próxima página

Chip	Frequência de Op. (MHz)	Potência do sinal emitido (dBm)
SX1278	137-525	20
SX1279	137-960	20

Fonte: (BRANCO, 2020)

A Figura 8 ilustra o diagrama de blocos do chip LoRa SX1262. Este chip é capaz de transmitir com uma potência de até 22 dBm. Ele dispõe de dois osciladores: um de 64 kHz e outro de 13 MHz. O oscilador de 13 MHz é empregado para a comunicação SPI, enquanto o oscilador de 64 kHz é utilizado opcionalmente no modo SLEEP. Neste modo, o oscilador de 64 kHz permite que o transceptor desperte para realizar operações periódicas ou gerenciar o ciclo de trabalho (SEMTECH, 2021)

Figura 8 – Diagrama de blocos SX1262



Fonte: (SEMTECH, 2021)

2.4.6 Métricas para análise e cobertura

Segundo Reck (2024) RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) é uma medida usada em sistemas de comunicação sem fio para indicar a qualidade do sinal por meio da estimativa do nível de potência de um sinal recebido. Devido a fatores externos apenas o RSSI não é suficiente para indicar a qualidade do sinal portanto existe outros indicadores

que devem ser avaliados como por exemplo o SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) que fornece a relação entre a potência do sinal desejado e a potência de ruído em um sistema de comunicação

2.5 Modelos de propagação

Segundo Phillips, Sicker e Grunwald (2013) os modelos de propagação podem ser classificados em 7 categorias, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 3 – Classificação dos Modelos de Propagação

Categorias	Descrição
1-Modelos Teóricos ou Fundamentais	Modelos puramente analíticos derivados da teoria da propagação eletromagnética idealizada.
2- Modelos Básicos	Modelos que utilizam parâmetros como distância, frequência portadora, e alturas do transmissor e receptor. Modelos comuns em sistemas de comunicação.
3- Modelos de Terreno	4- Modelos semelhantes aos básicos, mas que também tentam computar perdas por difração devido à presença de obstáculos.
4- Modelos Suplementares	Modelos que não funcionam de forma independente e requerem ajustes em modelos existentes, como cobertura de frequência, obstruções, ou considerações de direcionalidade.
5-Modelos de Desvanecimento Estocástico	Modelos que adicionam uma variável aleatória para levar em conta desvanecimentos adicionais.
6- Modelos de Múltiplos Raios	Conhecidos como modelos de ray-tracing, estes modelos consideram muitos raios para analisar a propagação.
7-Modelos de Medição Ativa	Modelos que dependem de medições em ambientes desconhecidos para melhorar a precisão.

2.5.1 Modelagem matemática do modelo de Okumura-Hata

O modelo *Okumura-Hata* enquadra-se na classificação proposta por Phillips, Sicker e Grunwald (2013) como modelo básico. De acordo com Reck (2024) a equação do modelo *Okumura-Hata* pode ser expressa da seguinte forma:

$$L(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)] \log_{10}(d) + C$$

Em que:

- $L(dB)$ é a perda de caminho em decibéis.
- f é a frequência em MHz.
- h_b é a altura da antena da estação base em metros.
- h_m é a altura da antena do receptor (usuário) em metros.
- d é a distância entre o transmissor e o receptor em quilômetros.
- $a(h_m)$ é o fator de correção da altura da antena do receptor, dado por:

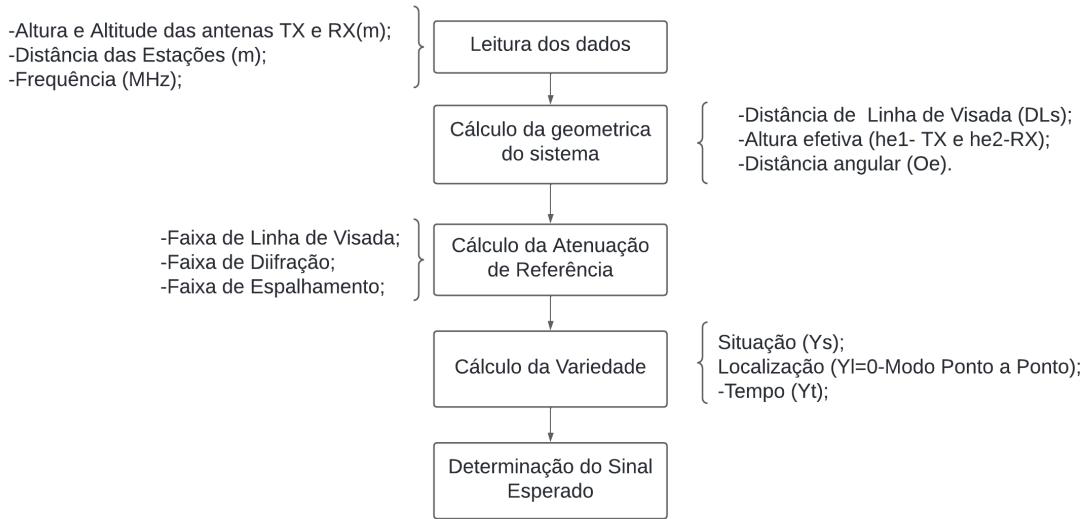
$$a(h_m) = \begin{cases} 8.29(\log_{10}(1.54h_m))^2 - 1.1 & \text{se } f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log_{10}(11.75h_m))^2 - 4.97 & \text{se } f > 200 \text{ MHz} \end{cases}$$

- C é um fator de correção que depende do ambiente:

$$C = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{para áreas urbanas} \\ -2(\log_{10}(f/28))^2 - 5.4 & \text{para áreas suburbanas} \\ -4.78(\log_{10}(f))^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.94 & \text{para áreas abertas} \end{cases}$$

2.5.2 Algoritmo de Longley-Rice

De acordo com Reck (2024), o modelo Longley-Rice é um dos modelos clássicos de propagação de rádio e pode ser classificado como determinístico. A Figura 9 apresenta o diagrama do algoritmo. Este modelo utiliza uma série complexa de equações e algoritmos que levam em conta diversos fatores, como a topografia do terreno, as condições atmosféricas, em equações e sub-equações.

Figura 9 – Algoritmo do Modelo Longley-Ric

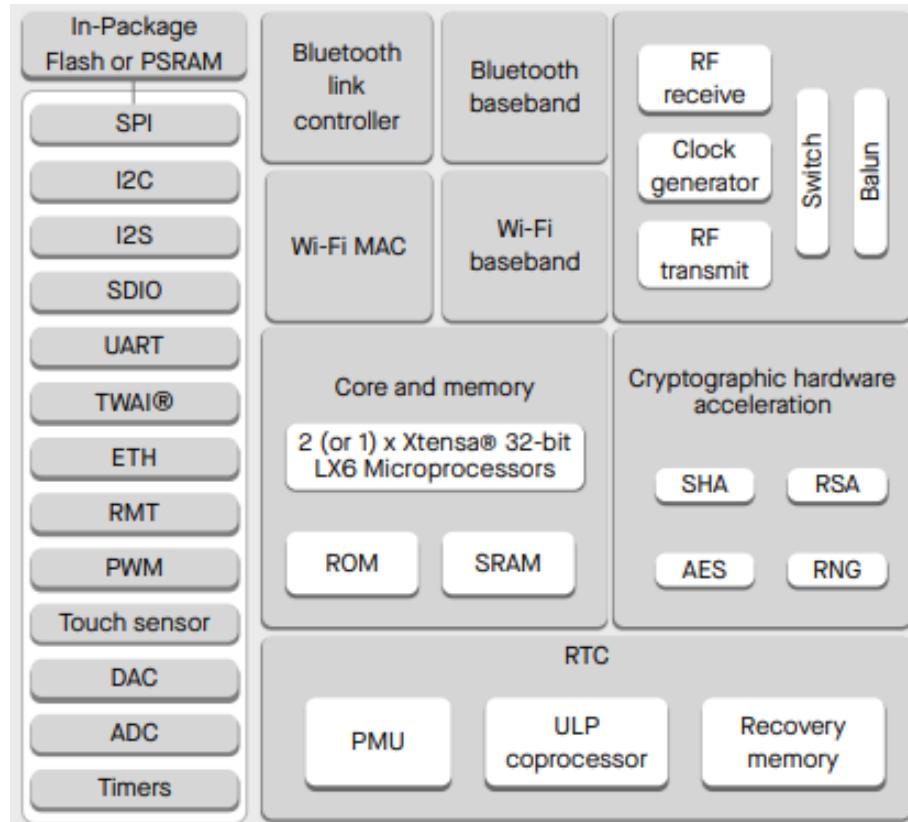
Fonte: (AMARAL, 2012)

2.6 Sistemas Embarcados

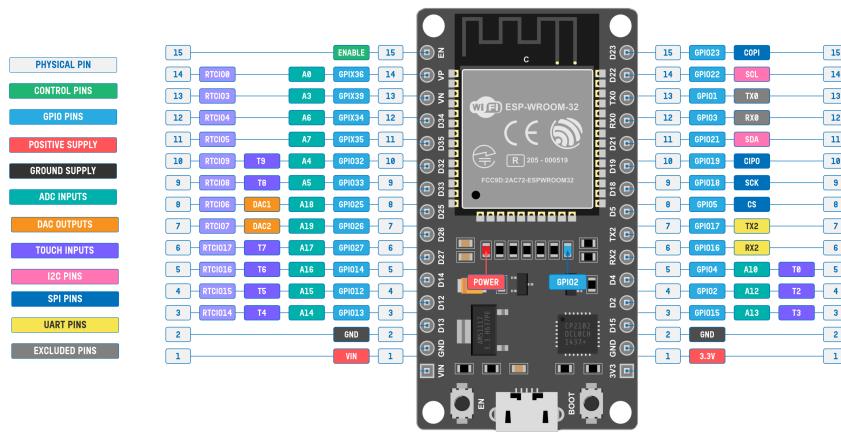
Sistemas embarcados são dispositivos de computação dedicados a realizar um conjunto específico de funções dentro de um dispositivo. Os microcontroladores têm sido amplamente utilizados em sistemas embarcados sendo aplicado em muitos dispositivos eletrônicos por várias décadas. Os microcontroladores são conhecidos por seu baixo custo e pela integração de uma vasta gama de periféricos internos, como temporizadores, conversores analógico-digitais e interfaces de comunicação (OLIVEIRA; ANDRADE, 2010).

2.6.1 ESP32

O ESP32 sistema *dual-core* com duas CPUs, projetado com a tecnologia de 40 nm de baixa potência. Combina *Wi-Fi* e *Bluetooth* de 2,4 GHz, tem suporte para SPI, I2C, UART, ADC, DAC. Além das demais funções presentes no diagrama de blocos funciona da Figura 10 (Espressif Systems, 2019).

Figura 10 – Diagrama de Blocos Funcional ESP32

Fonte: (Espressif Systems, 2019)

Figura 11 – ESP32 DevKit V1 Diagrama

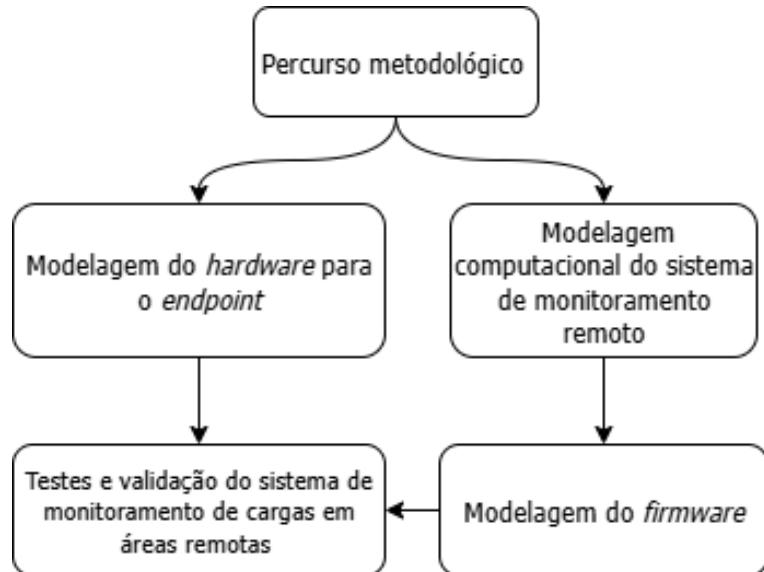
Fonte: (CIRCUITSTATE, 2022)

O kit de desenvolvimento ESP32 DevKit V1 representado na Figura 11 é amplamente utilizado, composto pelo chip ESP32, composto pelo microcontrolador ESP-WROOM-32 em que há 34 pinos GPIO disponíveis. Esses pinos são nomeados de 0 a 39. Os GPIOs 20, 24, 28, 29, 30 e 31 não são acessíveis (CIRCUITSTATE, 2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é descrita o percurso metodológico (Figura 12) aplicada ao trabalho. Foram apresentados o funcionamento detalhado de cada módulo e a integração entre os diversos componentes, considerando suas particularidades e utilidades, os requisitos do projeto, ferramentas computacionais e de *hardware* utilizado.

Figura 12 – Percurso metodológico

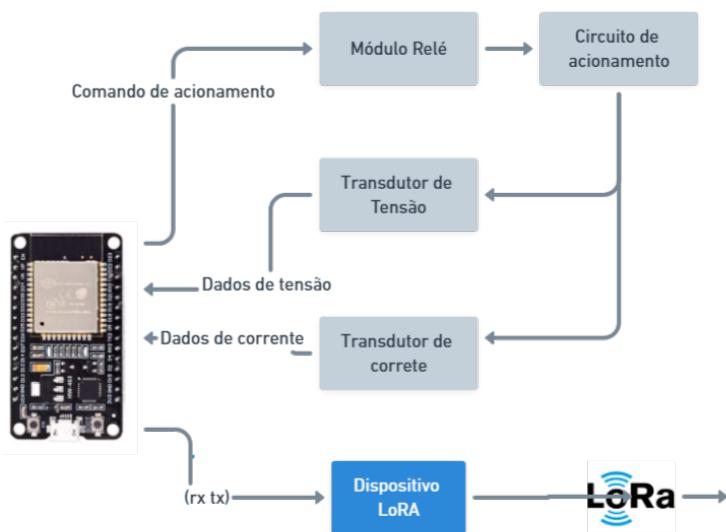


Fonte: Autoria própria

3.1 Modelagem do *hardware*

O *end-point LoRa* é responsável pela coleta dos dados de tensão e corrente da carga a ser monitorada. Ele é equipado com o módulo sensor de tensão monofásico CA ZMPT101B e o ACS712 para medir corrente alternada. A Figura 13 apresenta o detalhamento do módulo *end-point*.

Figura 13 – End-point LoRa



Fonte: Autoria própria

O sensor ACS712 representado na Figura 15 oferece uma solução econômica e precisa para medição de corrente alternada ou contínua em sistemas industriais, comerciais e de comunicação, sendo amplamente utilizado em aplicações como controle de motores e proteção contra sobrecorrente (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2024).

O módulo sensor de tensão monofásico CA ZMPT101B representado na Figura 14 é baseado em um transformador de tensão ZMPT101B de alta precisão usado para medir a tensão CA (MACHESO, 2022).

Figura 14 – Sensor ZMPT101B



Fonte: (MACHESO, 2022)

Figura 15 – Sensor ACS712



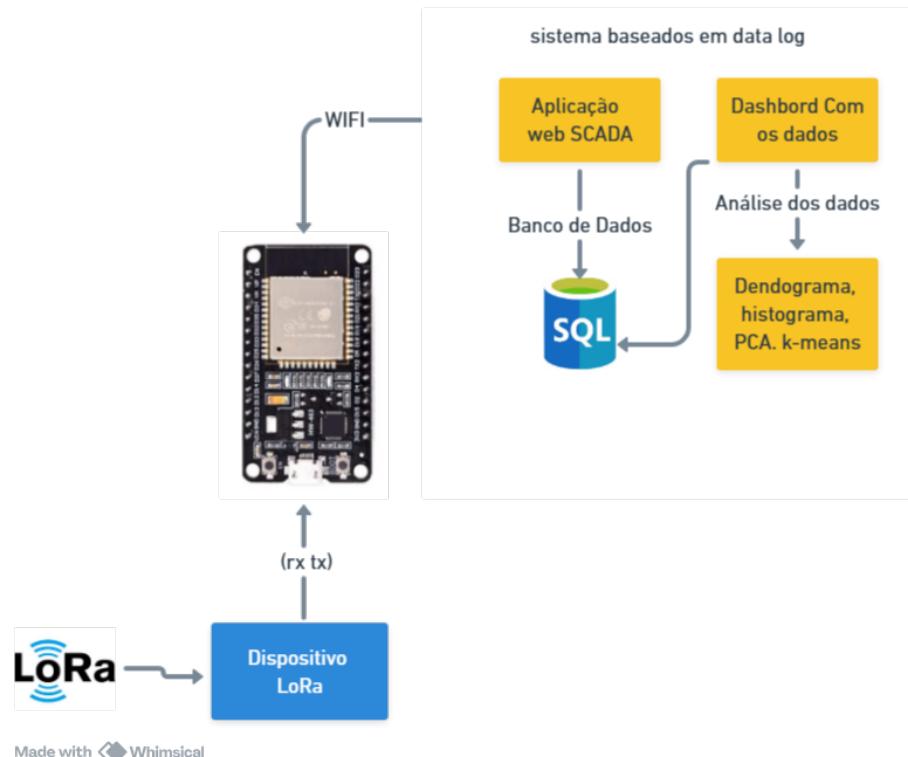
Fonte: (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2024)

3.1.1 *Gateway LoRa*

O *gateway LoRa*, utilizando o microcontrolador ESP32, é responsável por receber os dados transmitidos pelo *end-point* e inseri-los em um banco de dados. O *gateway* realiza as seguintes funções:

- **Recepção de Dados:** O *gateway* recebe os dados enviados pelo *end-point* via rede LoRa.
- **Processamento e Armazenamento:** Os dados recebidos são processados e armazenados em um banco de dados para posterior análise.
- **Interface com o Banco de Dados:** O ESP32 se comunica com o banco de dados, realizando operações de inserção e atualização dos dados coletados.

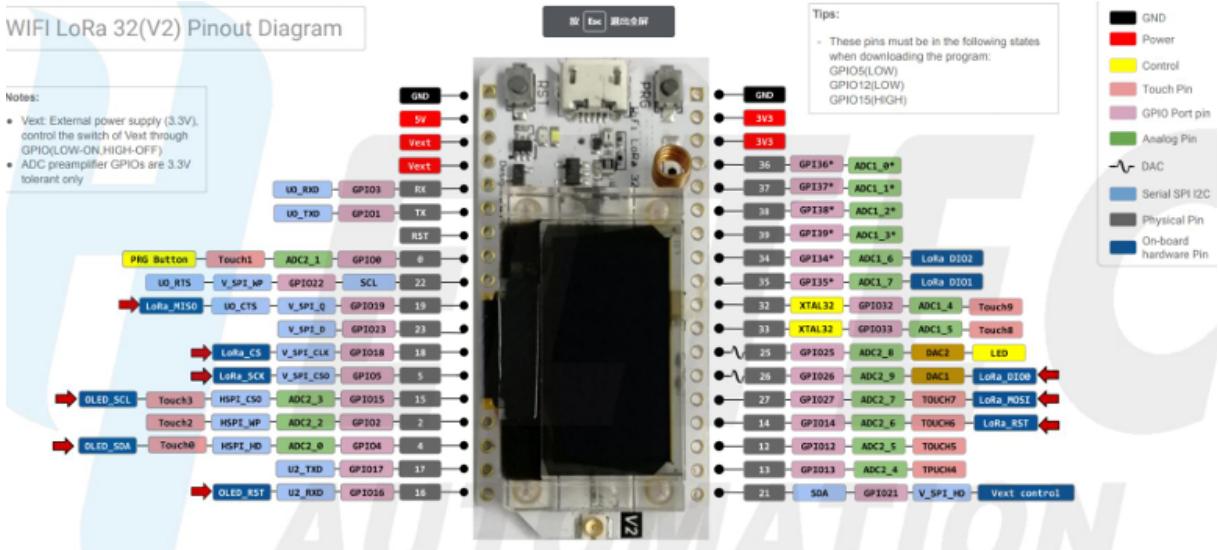
Figura 16 – *Gateway LoRa*



Fonte: Autoria própria

3.1.2 *LoRa módulo*

Entre os módulos listados no Quadro 2 será utilizado o SX1276, presente na placa Heltec WiFi LoRa 32 (V2). Os módulos de transmissão de dados sem Heltec WiFi LoRa

Figura 17 – Heltec WiFi LoRa 32 (V2)

Fonte: (Heltec Automation Technology Co., Ltd., 2020)

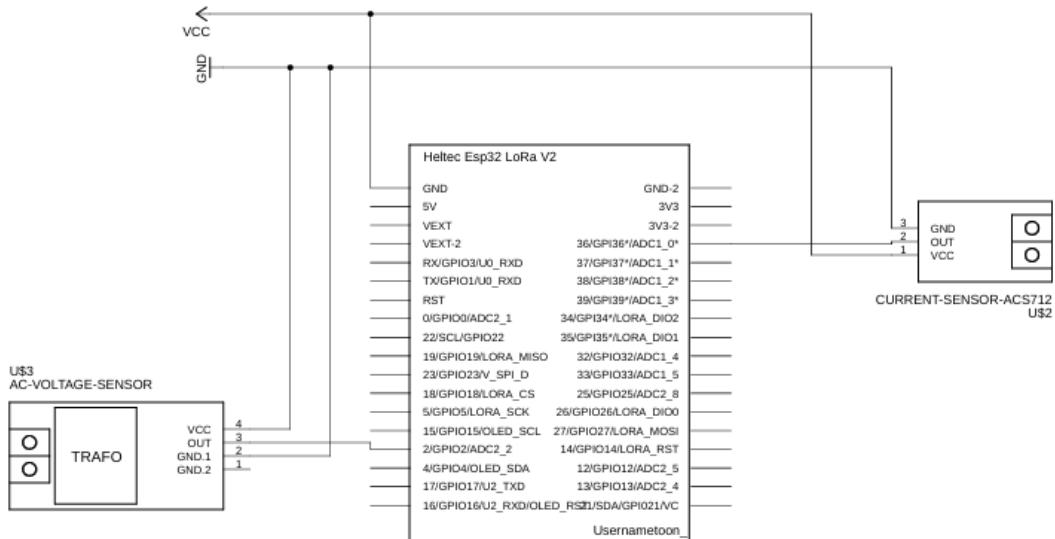
32 (V2) é uma placa projetada e produzida pela Heltec Automation™. É um produto baseado no ESP32 + SX1276 esse chip tem uma sensibilidade de -135 dBm; (Heltec Automation Technology Co., Ltd., 2020).

3.1.3 Montagem do Circuito

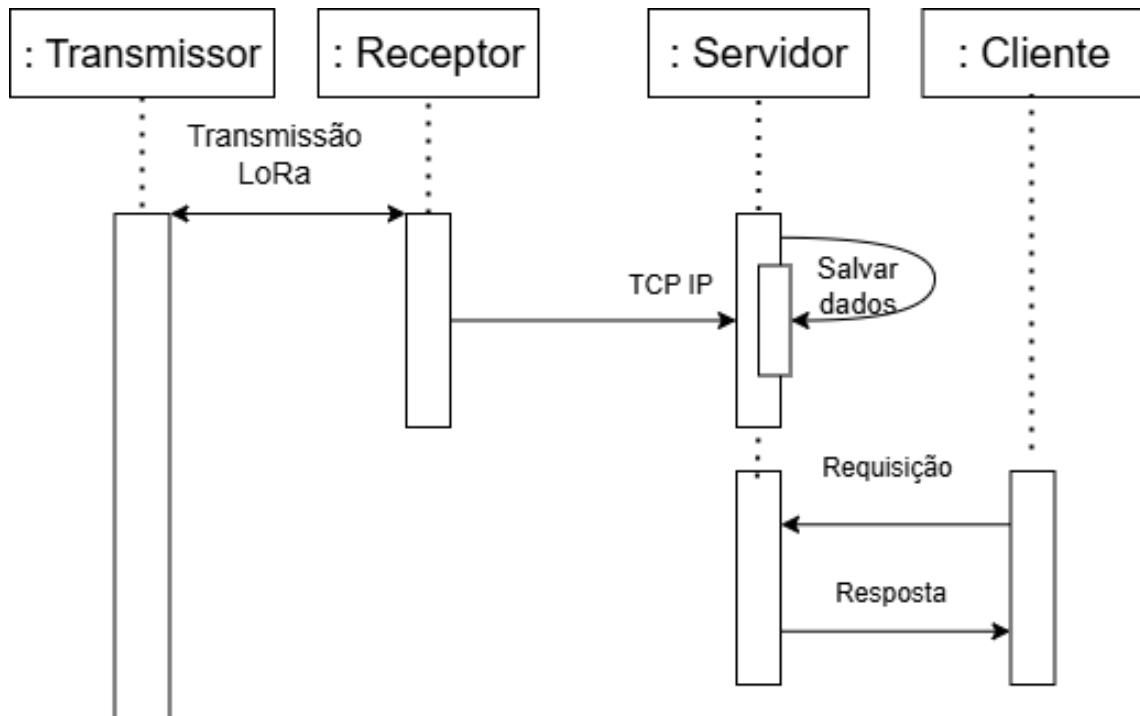
A Figura 18 mostra o diagrama esquemático do sistema embarcado utilizado para monitoramento da tensão e corrente, utilizando um microcontrolador ESP32 LoRa V2 conectado a sensores ACS712 e o sensor ZMPT101B de tensão AC. Esses sensores foram escolhidos devido a compatibilidade com o microcontrolador sem a necessidade da complementação com circuitos auxiliares, o que facilita a execução do circuito.

3.2 Modelagem Computacional do Sistema

A modelagem do sistema proposto é composto por dois dispositivos um *end-point* responsável pela coleta e transmissão de dados de tensão e corrente da carga a ser monitorada e um *gateway* LoRa que utiliza o microcontrolador ESP32, este responsável pela inserção de dados no banco de dados. A Figura 19 apresenta a sequência de operação do sistema, o dado é trafegado para o transmissor para o receptor via LoRa, o receptor comunica com o servidor e salva os dados no banco disponibilizando para o cliente quando requisitado.

Figura 18 – Diagrama de ligação

Fonte: Autoria própria

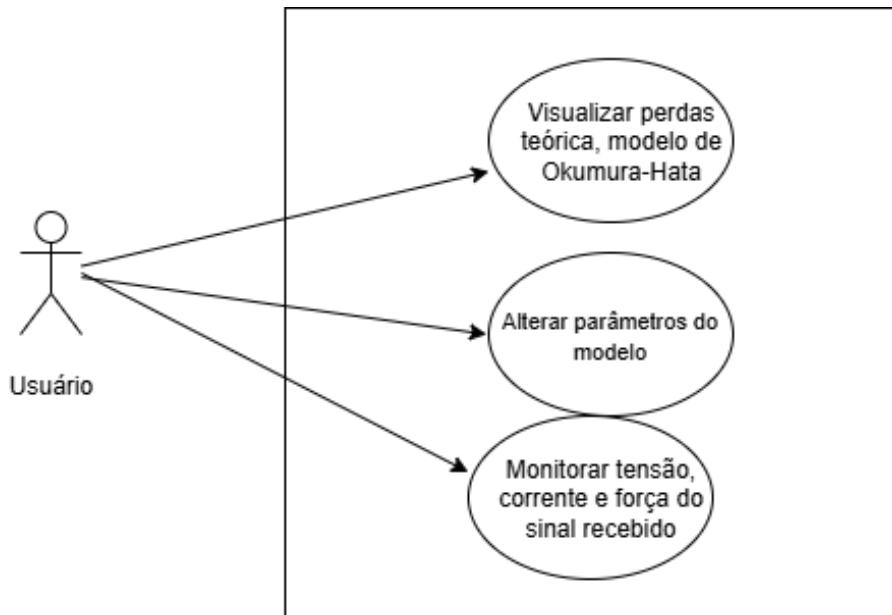
Figura 19 – Diagrama de sequência do operação do sistema

Fonte: Autoria própria

Com a finalidade de melhor avaliar as potenciais perdas geradas na propagação do sinal LoRa, nas diversas localidades, idealizou-se uma aplicação para avaliar o RSSI baseando-se nos modelos teóricos, juntamente com os sistema para o monitoramento de tensão e corrente de cargas elétricas. A Figura 20 apresenta o diagrama de caso de uso,

no modelo proposto o usuário tem a funcionalidade de visualizar perdas teóricas usando o modelo de Okumura-Hata, ajustar parâmetros desse modelo e monitorar grandezas elétricas e do sinal recebido.

Figura 20 – Diagrama de caso de uso



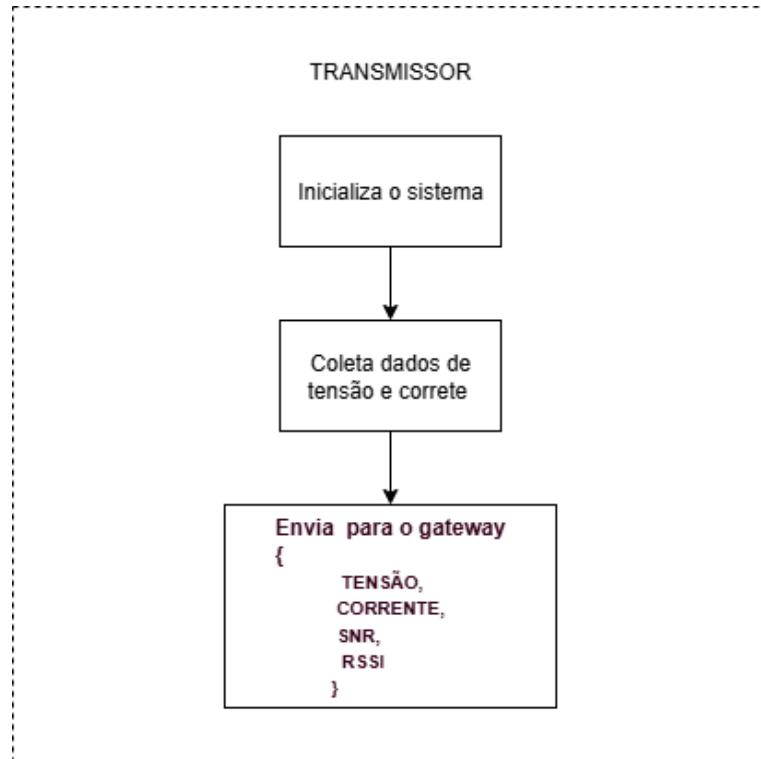
Fonte: Autoria própria

3.2.1 Modelagem do *firmware*

Na Figura 22 apresenta-se o diagrama de sequência do receptor, em primeira fase incia-se o dispositivo, conecta-se na rede local inicializa-se o LoRa e incia o processo de escuta, quando uma menseagem chega no dispositivo, é enviadoa para o servidor, esse por sua vez salva os dados no banco de dados.

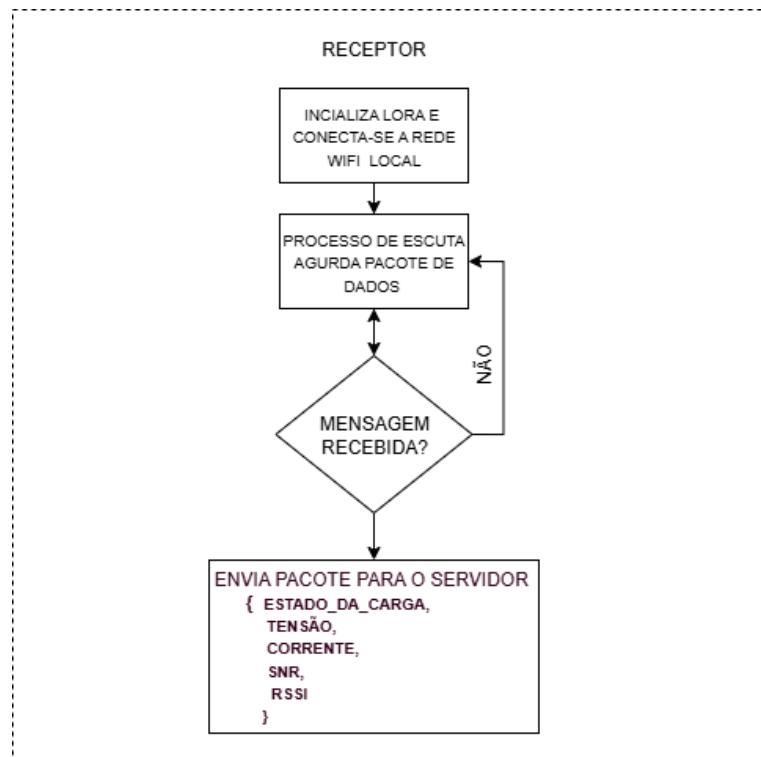
Foi utilizada a comunicação LoRa com os parâmetros listados na Tabela 5, adequados para aplicações em redes públicas na faixa de 915 MHz. O *Spreading Factor* (SF) foi configurado em 7, conforme descrito na Seção 2.2.4 da fundamentação teórica, esse parâmetro determina o comprimento do código de espalhamento e, portanto, controla a velocidade de transmissão dos dados. O valor foi escolhido por representar um bom equilíbrio entre alcance, taxa de transmissão.

Figura 21 – Fluxograma *firmaware* do transmissor



Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Fluxograma *firmaware* do receptor



Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Parâmetros utilizados para a comunicação LoRa

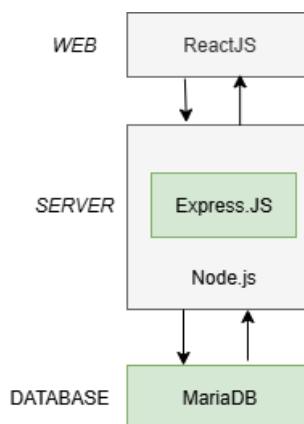
Parâmetro	Valor utilizado	Descrição
Frequência	915E6 (915 MHz)	Frequência de operação
<i>Spreading Factor</i> (SF)	7	Taxa de espalhamento (6 a 12)
<i>Bandwidth</i> (BW)	125E3 (125 kHz)	Largura de banda
<i>Coding Rate</i> (CR)	5 (4/5)	Taxa de codificação de erro
Potência de transmissão	17 dBm	Nível de potência de saída

3.2.2 Modelagem da interface *web*

A Figura 23 apresenta a estrutura da aplicação utilizando as tecnologias ReactJS, Express.js e MariaDB. Esse conjunto de tecnologias foi adotado devido à familiaridade do autor com essas ferramentas, o que permitiu maior agilidade no desenvolvimento. No entanto, a aplicação poderia ser implementada com qualquer outro conjunto de tecnologias equivalentes

Na camada *WEB*, a interface do usuário foi construída com ReactJS. Essa interface é responsável por exibir as informações ao usuário e realizar requisições para o servidor *backend* de forma assíncrona, garantindo maior fluidez e responsividade na interação com o sistema.

A camada *SERVER* é composta por um ambiente Node.js, no qual está incorporado o framework Express.js, responsável pelo roteamento das requisições, tratamento das rotas e gerenciamento das regras de negócio da aplicação. Por fim, na camada *DATABASE*, está o MariaDB, um sistema de gerenciamento de banco de dados relacional utilizado para armazenar as informações.

Figura 23 – Estrutura da aplicação utilizando React e express

Fonte: Autoria própria

3.2.3 Parametrização da Simulação

Conforme apresentado na Seção 2.5.1, o modelo de Okumura-Hata considera variáveis como a frequência de operação, a altura das antenas transmissora e receptora, a distância entre os módulos e o tipo de ambiente. Uma vez definidos os cenários (rural e urbano), os parâmetros simulados foram estabelecidos e ajustados de forma a possibilitar uma comparação entre os obtidos. A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados na simulação;

Tabela 5 – Parâmetros Utilizados para o Modelo Okumura-Hata

Parâmetro	Valor
Frequência do Sinal (f)	900 MHz
Altura da Antena Transmissora (h_t)	3 metros
Altura da Antena Receptora (h_r)	1,5 metros
Ambiente	Rural
Distâncias Analisadas	1 km a 10 km

3.2.4 Definição dos Locais e Pontos de Teste

Definiu-se dois cenários distintos: um rural e outro urbano. Cada local foi selecionado considerando aspectos como a topografia, a existência de obstáculos físicos, a visibilidade direta entre os módulos.

No ambiente rural (Figura 24) os testes foram realizados em uma área plana sem obstruções entre transmissor e receptor, para avaliar o comportamento da propagação do sinal nessas condições por meio da análise dos indicadores.

Figura 24 – Imagem Aérea da Área de Testes



Fonte: Autoria própria

Já no ambiente urbano (Figura 25) os testes ocorreram em uma área com edifica-

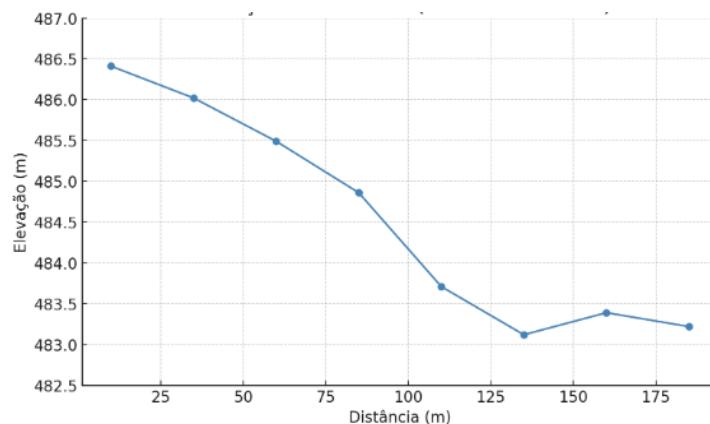
ções, variação de elevação do terreno e elementos naturais, o que proporciona um cenário realista com possíveis interferências.

Figura 25 – Teste ambiente urbano



Fonte: (Google LLC, 2024)

Figura 26 – Elevação por ponto de teste ambiente urbano



Fonte: Autoria própria

Os pontos de teste foram distribuídos em distâncias progressivas em relação ao *gateway* LoRa, variando a posição até que a transmissão não fosse mais possível. O objetivo foi determinar o raio de atuação, a fim de aplicar a solução de forma segura, sem comprometimento na integridade dos dados enviados e recebidos. Esses dados experimentais foram contrastados com os resultados simulados por meio do modelo de Okumura-Hata, permitindo validar a cobertura e o desempenho da comunicação em diferentes cenários.

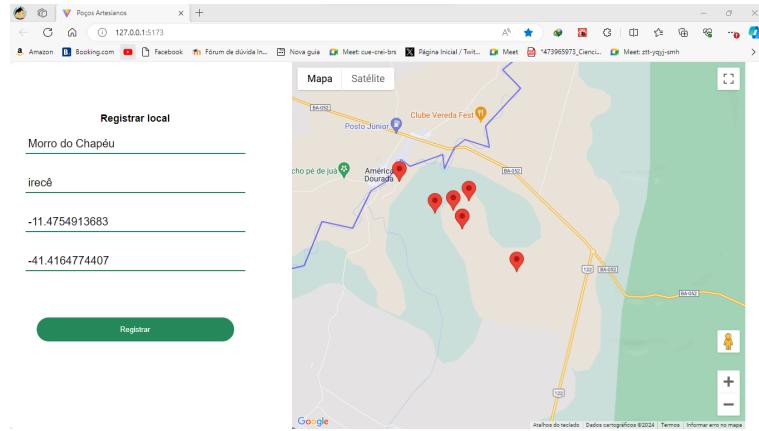
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes para validação do trabalho. Cada módulo do sistema foi testado separadamente, de acordo com sua funcionalidade, em seguida foram realizados testes do sistema funcionando integralmente, aplicado ao protótipo em laboratório.

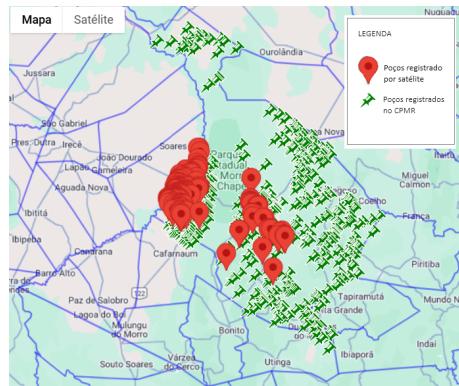
4.1 Aplicação desenvolvida

A aplicação *web* foi desenvolvida com o conjunto de ferramentas descritas na Seção 3.2.2. Foi implementado um conjunto de regras e rotas responsáveis por registrar e consultar as localizações das cargas, armazenar e retornar os parâmetros elétricos monitorados esses oriundos do receptor, simular a qualidade do sinal de comunicação com base no modelo matemático de Okumura-Hata, além de armazenar os dados reais trafegados via tecnologia LoRa. Essas informações são cruciais, uma vez que o trabalho visa monitorar cargas em áreas remotas. Utilizando imagens de satélite, a aplicação desenvolvida permitiu identificar locais com possíveis cargas para monitoramento, a tela de registro das localidades é apresentado no Figura 27. O estudo focou na cidade de Morro do Chapéu - BA, onde foram encontrados 182 registros.

De acordo com Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (2024), existem 518 poços e fontes naturais registrados na região. Essa discrepância ocorre porque o método de registro por imagens de satélite só conseguiu identificar poços com reservatórios visíveis. Outro fato é que nem todo reservatório visível está registrado como apresentado na Figura 28.

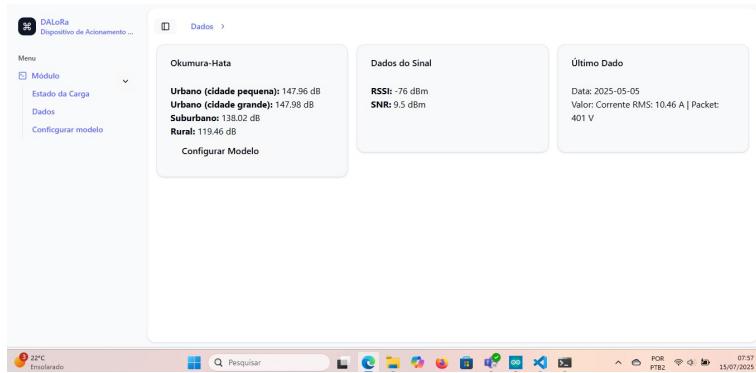
Figura 27 – Modelagem computacional para registrar cargas em áreas remotas

Fonte: Autoria própria

Figura 28 – Poços e Fontes Naturais em Morro do Chapéu

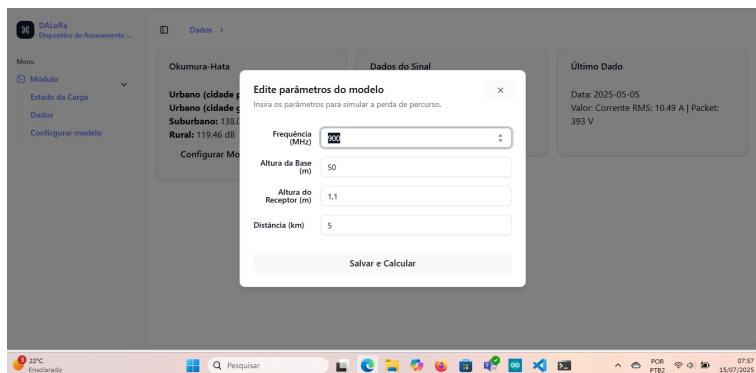
Fonte: Autoria própria

A Figura 29 mostra a interface do *dashboard* da aplicação desenvolvida a qual foi projetada para fornecer uma visualização objetiva dos parâmetros monitorados a tela é composta por um conjunto de painéis informativos dispostos de forma responsiva, permitindo a visualização dos parâmetros elétricos de uma carga, bem como a simulação da qualidade do sinal de comunicação utilizando o modelo matemático de Okumura-Hata, a Figura 30 apresenta o formulário de configuração dos parâmetros utilizados na análise do modelo. Esse formulário permite ao usuário ajustar variáveis como frequência do sinal, altura da antena transmissora, altura da antena receptora e distância entre os pontos de comunicação, viabilizando uma avaliação dinâmica da propagação do sinal em diferentes cenários.

Figura 29 – Aplicação de monitoramento

Fonte: Autoria própria

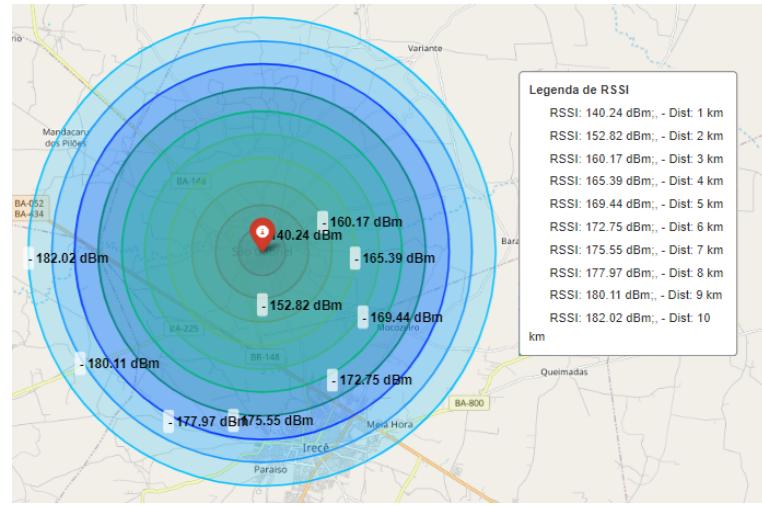
Foi utilizada a comunicação LoRa com os parâmetros conforme a Tabela 4, adequados para aplicações em redes públicas na faixa de 915 MHz.

Figura 30 – Tela de parâmetros do modelo

Fonte: Autoria própria

4.2 Análise Comparativa

Os testes foram realizados em dois cenários distintos. O primeiro corresponde a uma área rural, com terreno nivelado e sem interferências, como representado na Figura 24, e com todos os pontos situados na cota de 486,00 m, conforme apresentado na Tabela 6. O segundo cenário, ilustrado na Figura 25, refere-se a um ambiente urbano, com diferentes elevações do terreno em cada ponto, como registrado na Tabela 7. A Figura 31 ilustra a perda de sinal para distâncias de até 10 km, evidenciando uma perda de -182.02 dB, essa visualização foi pensada para proporcionar uma fácil percepção do raio de atuação do dispositivo.

Figura 31 – Perda de Percurso no Modelo Okumura-Hata em Ambiente Rural

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 – Valores de RSSI, SNR, elevação e distância para o ambiente rural

Ponto	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Elevação (m)	Distância (m)
1	-37	9,8	486,00	17,8
2	-70	9,3	486,00	43,7
3	-74	9,0	486,00	63,6
4	-81	9,8	486,00	96,9
5	-88	8,5	486,00	130,3
6	-94	7,2	486,00	168,8
7	-98	9,0	486,00	159,5
8	-97	5,0	486,00	183,3
9	-100	2,0	486,00	225,5

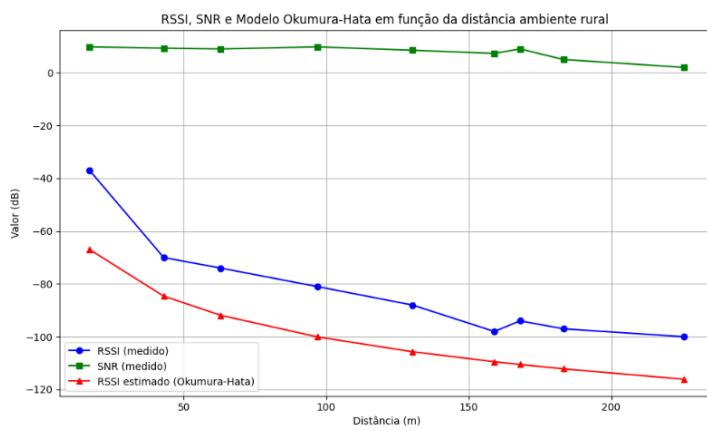
Tabela 7 – Valores de RSSI, SNR, elevação e distância para o ambiente urbano

Ponto	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Elevação (m)	Distância (m)
1	-92	9,0	486,41	10
2	-87	9,5	486,02	35
3	-61	9,5	485,49	60
4	-89	9,3	484,86	85
5	-90	9,8	483,71	110
6	-96	8,5	483,12	135
7	-94	9,0	483,39	160
8	-107	1,0	483,22	185

A Figura 32 apresenta a comparação entre os dados obtidos experimentalmente e a

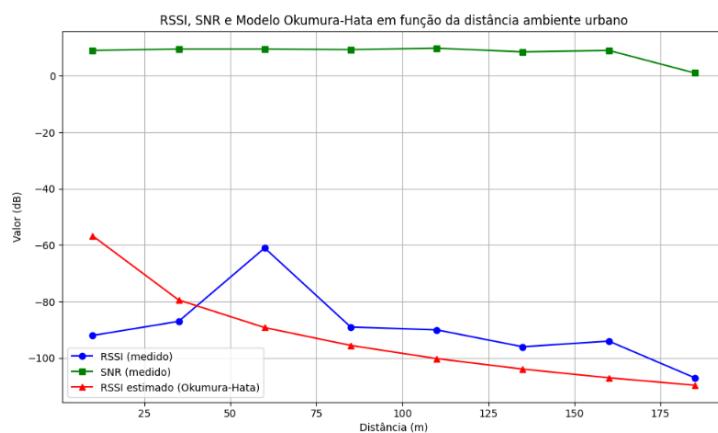
simulação do modelo de Okumura-Hata para uma altura da base e do receptor de 1,5 m, no ambiente rural. Esses parâmetros foram escolhidos para representar fielmente os testes realizados. A Figura 33 mostra a comparação dos dados obtidos para a simulação no ambiente urbano, considerando altura da base de 3 m e do receptor de 1,5 m. Com base na análise dos gráficos, comparando os valores de RSSI e SNR medidos com os valores estimados pelo modelo de Okumura-Hata, é possível observar que o RSSI medido e o estimado apresentam uma tendência semelhante de queda com o aumento da distância, já o SNR teve comportamento parecido em ambos os testes.

Figura 32 – RSSI, SNR e Modelo de Okumura-Hata em função da distância ambiente rural



Fonte: Autoria própria

Figura 33 – RSSI, SNR e Modelo de Okumura-Hata em função da distância ambiente urbano



Fonte: Autoria própria

O dispositivo utilizado possui sensibilidade máxima de -137 dBm, conforme especificado pelo fabricante. No entanto, esse limite não foi atingido nos testes realizados. A maior atenuação do sinal em que ainda foi possível a comunicação bidirecional foi de -107 dBm no ambiente urbano e -100 dBm no ambiente rural, conforme Tabela 7 e Tabela 6,

respectivamente. As distâncias máximas alcançadas foram de 185 m no ambiente urbano e 225,5 m no ambiente rural. Observa-se, ainda, que nessas distâncias o sinal apresentou nível de ruído de 2 dB, o que compromete a qualidade da comunicação.

Comparando a tenuação máxima do dispositivo utilizado com os dados obtidos na simulação pelo modelo de Okumura-Hata, observa-se que, a uma distância de 1 km, a perda teórica estimada é de aproximadamente -144 dBm, valor que ultrapassa a sensibilidade do dispositivo utilizado.

4.2.1 Considerações sobre os Desvios e Dificuldades Técnicas

Durante o processo de desenvolvimento do modelo, foram identificados diversos desafios técnicos que impactaram tanto o desempenho quanto o cronograma previsto. Esta seção apresenta uma análise dos principais desvios em relação ao planejamento original, bem como as dificuldades encontradas nas etapas de implementação, testes e integração dos sistemas de *software* e *hardware*. Os principais pontos observados foram:

- **Desvios no cronograma:** Atrasos causados por retrabalhos e falhas de compatibilidade entre módulos.
- **Problemas de integração:** Inconsistências na comunicação entre os componentes de *hardware* e o *software* embarcado.
- **Limitações técnicas:** Recursos de processamento e memória abaixo do esperado, exigindo otimizações imprevistas.
- **Falhas funcionais:** Identificadas durante os testes de validação, algumas funcionalidades não operaram conforme as especificações iniciais.
- **Fatores externos:** Dificuldades logísticas, aquisição de peças e limitações de fornecedores.

Apesar dos obstáculos, a análise dos problemas contribuiu para ajustes no projeto e para o amadurecimento da solução final.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a modelagem e implementação de um sistema computacional para o monitoramento remoto de cargas em áreas de difícil acesso, utilizando a tecnologia LoRa. Os testes realizados evidenciaram que é possível estabelecer comunicação entre os dispositivos. A aplicação do modelo de Okumura-Hata, aliada à análise dos indicadores SNR e RSSI, permitiu validar a qualidade do sinal e delimitar a distância operacional segura para o sistema.

A principal dificuldade enfrentada durante o desenvolvimento foi a compatibilização do sensor de corrente, devido à necessidade de um circuito de condicionamento de sinais para viabilizar o uso de um módulo de medição não invasivo. Essa limitação foi contornada por meio da substituição do sensor por um modelo compatível com os níveis de corrente e tensão do microcontrolador utilizado.

Dessa forma, a proposta contribui significativamente para a superação dos desafios de conectividade e automação em regiões remotas, com foco na redução de custos e no aumento da eficiência operacional de sistemas de acionamento remoto, como bombas de irrigação.

Em continuidade ao desenvolvimento técnico e metodológico apresentado neste estudo, propõe-se a submissão do modelo computacional para registro de software, com o objetivo de formalizar e proteger a propriedade intelectual da solução desenvolvida. Além disso, planeja-se a apresentação dos resultados obtidos em eventos científicos da área de engenharia, visando divulgar o conhecimento gerado, compartilhar experiências com a comunidade acadêmica e promover discussões sobre possíveis aprimoramentos técnicos e aplicações práticas do sistema proposto.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a realização de testes com con-

juntos distintos de dispositivos, com o objetivo de desenvolver uma solução aplicável a maiores distâncias, ampliando assim a área de cobertura. O modelo computacional apresentado neste trabalho pode ser aplicado em diferentes áreas, adaptando-se os sensores para o monitoramento de variáveis distintas. Por exemplo, a estrutura proposta pode ser utilizada com sensores de vibração para análise do comportamento de motores, bombas ou estruturas em terrenos instáveis. Da mesma forma, é possível integrar sensores de umidade e temperatura para aplicações agrícolas, ambientais ou industriais.

Além dessas possibilidades, destaca-se o potencial de aplicação do modelo para o monitoramento da estrutura rochosa da Gruta do Bom Jesus da Lapa, localizada no oeste da Bahia. Este ponto turístico e religioso recebe anualmente cerca de meio milhão de visitantes durante as romarias, o que evidencia a importância de garantir a segurança estrutural do local. A gruta está inserida em um maciço de calcário com cerca de 90 metros de altura. Do ponto de vista geológico, a estrutura encontra-se no centro da cidade e em uma área de baixa umidade e altas temperaturas anuais.

Nesse contexto, o percurso metodológico adotado neste trabalho pode ser adaptado para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo da integridade estrutural da gruta, utilizando sensores de vibração, temperatura e umidade. Tal iniciativa não apenas contribuiria para a preservação de um patrimônio histórico e religioso, como também poderia servir de estímulo para novos projetos acadêmicos na área de engenharia elétrica, voltados à proteção de estruturas naturais em ambientes extremos.

A replicação do modelo em outros cenários, como cavernas, encostas e formações rochosas de interesse turístico ou científico, representa uma vertente promissora para futuras pesquisas.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Telecomunicações. **Cobertura Móvel**. 2024. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura/cobertura-movel>>.

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). *Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017*. 2017. Regulamentação de requisitos técnicos para equipamentos de radiação restrita. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448>>.

AHMED JOSE LUIS GALLARDO, M. D. Z. M. A. P. G. C. N. J. R. C. M. A. Lora based iot platform for remote monitoring of large-scale agriculture farms in chile. *Sensors*, MDPI, v. 22, 2022.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. 22. ed. Manchester, NH, USA: Allegro MicroSystems, 2024.

AMARAL, C. T. do. *Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice sob a perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Á rea de Clima Tropical*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais , Programa de Pos-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

ANWAR MD. RIFAT HAZARI, M. A. M. A. M. Design and analysis of iot-based remote load monitoring and outage management system. *Processes*, 2021.

BRANCO, F. P. *Sistema de Comunicação baseado na Tecnologia LoRa para Aplicações IoT*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, novembro 2020.

CIRCUITSTATE. *DOIT ESP32 DevKit V1 Wi-Fi Development Board - Pinout Diagram*. 2022. <<https://www.circuitstate.com/pinouts/doit-esp32-devkit-v1-wifi-development-board-pinout-diagram-and-reference/>>. Accessed on August 16, 2024.

Espressif Systems. *ESP32 Technical Reference Manual*. [S.l.], 2019. <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf>. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf>.

GAUSHELL, H. T. D. D. J. Supervisory control and data acquisition. *IEEE*, v. 75, 1987.

Google LLC. *Google Earth*. 2024. <<https://earth.google.com>>. Software de visualização geográfica em 3D. Acesso em: 21 jul. 2025.

- Heltec Automation Technology Co., Ltd. *WiFi LoRa 32 (V2) – LoRa Node Development Kit.* Rev 1.1. Chengdu, Sichuan, China, 2020. Manual técnico do módulo WiFi LoRa 32 V2. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>.
- Iberdrola. *Nossa Atividade - Smart Grids.* 2024. <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/smart-grids>>. Acesso em: 6 set. 2024.
- LEITE, J. V. de A.; CRUZ, A. F. dos S. Estudo e aplicação da smart grid no sistema elétrico de distribuição brasileiro. *XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS*, 2017. Disponível em: <<http://www.revistas.unifacs.br/index.php/sepa>>.
- MACHESO, D. T. P. S. Esp32 based electric energy consumption meter. *Int. J. Comput,* 2022.
- MEDEIROS, E. L. de. *Sistema de Supervisão de Consumo de Energia Elétrica em Redes LoRaWAN.* Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.
- MILANEZ, A. Y. et al. Conectividade rural: Situação atual e alternativas para superação da principal barreira à agricultura 4.0 no brasil. *BNDES Setorial*, BNDES, v. 26, n. 52, p. 7–43, 2020.
- OLIVEIRA, A. S. de; ANDRADE, F. S. de. *Sistemas Embarcados - Hardware e Firmware na Prática.* E-book. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2010. Accessed: 2024-09-05. ISBN 9788536520346. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520346/>>.
- PHILLIPS, C.; SICKER, D.; GRUNWALD, D. A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 15, n. 1, p. 255–270, 2013.
- RAMOS, J. de S. B. *Instrumentação Eletrônica sem Fio - Transmitindo Dados com Módulos XBee ZigBee e PIC16F877A.* Rio de Janeiro: GEN, 2012. ISBN 9788536519760.
- RECK, F. G. *Análise de Desempenho de Comunicação via Rede LoRa para Medição de Energia Elétrica em Área Urbana.* Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.
- ROCHOL, J. **Sistemas de Comunicação Sem Fio.** E-book. Porto Alegre: Grupo A, 2018. ISBN 9788582604564. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582604564/>>.
- SANCHEZ-IBORRA, M.-D. C. R. State of the art in lp-wan solutions for industrial iot services. *Sensors*, MDPI, v. 16, 2016.
- SANTOS, M. M. D. *Supervisão de Sistemas - Funcionalidades e Aplicações.* Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 9788536520377. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520377/>>.
- SEMTECH. *SX1261/2 Long Range, Low Power, sub-GHz RF Transceiver Data Sheet.* Camarillo, CA, USA, 2021. Version 2.1. Disponível em: <<http://www.semtech.com>>.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas)**. 2024. Disponível em: <<https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>>.

SILVA, I. A. de S. Núcleos de desertificação do nordeste brasileiro: Suscetibilidade e dinâmica pluviométrica. *Anais do Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, v. 1, 2017. Doutorado em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Disponível em: <<https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2381>>.

SILVA, J. P. S. B. da. *Plataforma de Teste de Gateway LoRa para IoT baseada em SDR*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2023.

ZANAJ, E. et al. Energy efficiency in short and wide-area iot technologies—a survey. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 2, 2021.



Este volume foi tipografado em L^AT_EX na classe CorujaTEX como uma demanda do Colegiado
do curso de Engenharia Elétrica da **UFOB! (UFOB!)**
(<https://github.com/ademariocarvalho/CCEE_UFOB_CorujaTEX>).