



INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA – IFPB  
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE BACHARELADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

LÍVIA DE CARVALHO CAMPOS LINS

**SENSORIAMENTO REMOTO DE CHAVE FUSÍVEL EM SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO**

JOÃO PESSOA – PB

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

L759s Lins, Lívia de Carvalho Campos.

Sensoriamento remoto de chave fusível em sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão / Lívia de Carvalho Campos Lins. - 2022.

51 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2022.

Orientação : Prof<sup>o</sup> D.r Luís Romeu Nunes.

1. Proteção do sistema de distribuição de energia elétrica. 2. Sistema supervisorio. 3. Chave fusível. 4. Estado da chave. 5. Faltas no sistema de distribuição de energia. I. Título.

CDU 621.316.9(043)

Lucrecia Camilo de Lima  
Bibliotecária - CRB 15/132

LÍVIA DE CARVALHO CAMPOS LINS

**SENSORIAMENTO REMOTO DE CHAVE FUSÍVEL EM SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

JOÃO PESSOA – PB

2022

LÍVIA DE CARVALHO CAMPOS LINS

**SENSORIAMENTO REMOTO DE CHAVE FUSÍVEL EM SISTEMAS DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, no Instituto Federal da Paraíba – IFPB, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho Aprovado em 27 de Dezembro de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **LUIS ROMEU NUNES**  
Data: 28/02/2023 21:11:15-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Luís Romeu Nunes (Orientador)  
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Documento assinado digitalmente  
 **FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA**  
Data: 01/03/2023 08:53:28-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Franklin Martins Pereira Pamplona  
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Documento assinado digitalmente  
 **WALMERAN JOSE TRINDADE JUNIOR**  
Data: 01/03/2023 10:04:02-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Walmeran Jose Trindade Junior  
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Aos meus pais que nunca mediram esforços para educação dos filhos e sempre se fizeram presentes nas conquistas e percalços da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Francisca de Fátima e Carlos Alberto, meus irmãos, Ian Lins e Amanda Lins por todo incentivo e apoio dedicado à minha formação acadêmica, além de todo suporte durante a construção deste trabalho.

À Gabriel Lira, meu companheiro e melhor amigo, que sempre acreditou no meu potencial e me deu força para enfrentar situações desafiadoras.

Às minhas amigas de infância e confidentes que sempre torceram pelo meu sucesso e felicidade, Ana Carla, Ana Júlia e Natália.

Às amigas formadas no Grupo Energisa durante o meu estágio, em especial à Kamila Bárbara, à Camila Neves e à Jordashe pelos conselhos e assistência.

Sou grata também, à todos os professores que contribuíram com minha formação durante o curso de engenharia elétrica, sobretudo ao professor Luís Romeu, por me acolher como filha, por compartilhar tantos ensinamentos e por sempre torcer pelo meu sucesso.

Por fim, e não menos importante, à um Deus de amor que fez com que tudo isso se tornasse realidade em minha vida.

*"Nunca deixe que lhe digam que não vale a  
pena acreditar no sonho que se tem."*

Renato Russo

## RESUMO

O presente trabalho discorre acerca de um dispositivo para sensoriamento remoto de chaves fusíveis e chaves fusíveis religadoras, que são ativos da rede de distribuição de energia elétrica de média tensão. Foi desenvolvido um protótipo, composto pelo microcontrolador ATmega2560 e pelo sensor giroscópio do módulo MPU-6050, capaz de identificar a abertura de uma chave fusível ou chave fusível religadora. O dispositivo é também capaz de, em caso de acidente de trânsito, detectar impacto no poste onde as chaves estão instaladas, estabelecendo assim um grau de risco para os transeuntes, principalmente na situação em que o poste foi inclinado e a chave não abriu. O sistema proposto pode realizar a transmissão dos dados, que representa o estado da chave, para um sistema supervisório de um centro de operações integradas via uma gama de sistemas, como: RF, GPRS, Internet, PLC, fibra óptica, dentre outros. O protótipo desenvolvido foi testado via link de rádio frequência na faixa de 417MHz, com potência de 37dBm, enviando dados para uma página em HTML remota que representa um sistema supervisório. O sistema proposto contribui para a agilidade das ações corretivas e a possibilidade de ações preventivas acertivas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, melhorando assim os indicadores de qualidade de oferta de energia elétrica, bem como a satisfação dos clientes. As simulações do equipamento foram realizadas em laboratório no IFPB e em espaço de testes da empresa Energisa Paraíba Distribuidora de Energia SA, para que fatores externos fossem levados em consideração quanto a eficácia de funcionamento do protótipo. A partir dos resultados obtidos durante a execução do presente trabalho, foi possível verificar o êxito do sistema proposto.

**Palavras-chave:** Sistema Supervisório, Chave Fusível, Estado da Chave, Faltas.

## ABSTRACT

This paper discusses a device for remote sensing of the medium voltage electrical power distribution network. A prototype was developed, composed by the ATmega2560 microcontroller and the gyroscope sensor of the MPU-6050 module, capable of identifying the opening of a fuse cutout or recloser fuse cutout. The device is also capable, in case of a traffic accident, to detecting impact on the pole where the fuse cutouts are installed, thus establishing a degree of risk to bystanders, especially in the situation where the pole has been tilted and the fuse cutout has not opened. The proposed system can transmit the data, which represents the state of the fuse cutout, to a supervisory system of an integrated operations center via a range of systems, such as: RF, GPRS, Internet, PLC, fiber optics, etc. The developed prototype was tested via radio frequency link in the 417 MHz band, with 37 dBm power, sending data to a remote HTML page representing a supervisory system. The proposed system contributes to the agility of corrective actions and the possibility of preventive actions in the electric power distribution systems, thus improving the quality indicators of electric power supply, as well as customer satisfaction. The equipment simulations were performed in the IFPB laboratory and in the test space of the company Energisa Paraíba Distribuidora de Energia SA, so that external factors were taken into consideration regarding the effectiveness of the prototype's operation. From the results obtained during the execution of this work, it was possible to verify the success of the proposed system.

**Keywords:** Supervisory System, Fuse Cutout, Fuse Cutout Status, Faults.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de compensação de continuidade 2021 . . . . .	14
Figura 2 – Índice de compensação de continuidade 2022 . . . . .	14
Figura 3 – Chave fusível . . . . .	17
Figura 4 – Chave fusível religadora . . . . .	18
Figura 5 – Centro Operacional Integrado . . . . .	19
Figura 6 – Comparação entre redes de comunicação . . . . .	20
Figura 7 – Diagrama simplificado de um sistema de distribuição de energia elétrica . . . . .	21
Figura 8 – Chave fusível utilizada em testes . . . . .	22
Figura 9 – Plataforma do Arduino Mega . . . . .	23
Figura 10 – Módulo MPU 6050 . . . . .	24
Figura 11 – Módulo conversor de nível lógico bidirecional . . . . .	25
Figura 12 – Ethernet Shield W5100 . . . . .	25
Figura 13 – Rádio GE MDS S4 . . . . .	26
Figura 14 – Arquitetura do sistema proposto . . . . .	27
Figura 15 – Circuito de ligação do MPU-6050 com Arduino . . . . .	28
Figura 16 – Leitura do sensor acelerômetro em repouso . . . . .	29
Figura 17 – Leitura do sensor giroscópio em repouso . . . . .	29
Figura 18 – Leitura do sensor giroscópio durante a abertura do Porta fusível . . . . .	31
Figura 19 – Calculadora de rede para IPV4 . . . . .	32
Figura 20 – Configurações da entrada de rede do computador . . . . .	32
Figura 21 – Carga Fantasma utilizada no sistema . . . . .	33
Figura 22 – Fonte utilizada no sistema de transmissão e recepção . . . . .	33
Figura 23 – Captura de tela 1 das configurações do rádio escravo . . . . .	34
Figura 24 – Captura de tela 2 das configurações do rádio escravo . . . . .	34
Figura 25 – Captura de tela 3 das configurações do rádio escravo . . . . .	35
Figura 26 – Sistema transmissor configurado com carga fantasma . . . . .	35
Figura 27 – Antena direcional utilizada no sistema . . . . .	36
Figura 28 – Captura de tela da página HTML do status da chave fusível . . . . .	37
Figura 29 – Captura de tela 1 das configurações do rádio mestre . . . . .	37
Figura 30 – Captura de tela 2 das configurações do rádio mestre . . . . .	38
Figura 31 – Captura de tela 3 das configurações do rádio mestre . . . . .	38



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COI	Centro Operacional Integrado
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DICRI	Duração da Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> - Serviço de Rádio de Pacote Geral
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> - Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
PLC	<i>Power line communication</i> - Comunicação via Rede Elétrica
RF	Rádio Frequência
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> - Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> - Frequência Ultra Alta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	12
1.1	FALTAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	12
1.2	SMARTGRID	12
1.3	MOTIVAÇÃO	13
1.4	OBJETIVOS	15
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	17
2.1	PROTEÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉ- TRICA	17
2.1.1	Chave fusível	17
2.1.2	Chave fusível religadora	18
2.2	CENTRO OPERACIONAL INTEGRADO (COI)	18
2.3	SCADA OU SISTEMA SUPERVISÓRIO	19
2.4	COMUNICAÇÃO	20
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	22
3.1	MATERIAIS	22
3.1.1	Controlador	23
3.1.2	Sensor MPU 6050	23
3.1.2.1	Protocolo I2C	24
3.1.3	Módulo conversor de nível lógico bidirecional	24
3.1.4	Ethernet Shield	25
3.1.5	Meio de Comunicação Remota	26
3.2	SISTEMA PROPOSTO	27
3.2.1	Sistema Transmissor Proposto	27
3.2.2	Sistema Receptor Proposto	36
3.2.3	Análise de Impacto ao Poste	39
<b>4</b>	<b>Resultados e discussões</b>	43
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	47
	REFERÊNCIAS	49

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo discorre a cerca da problemática, motivadores e objetivos que norteiam o presente trabalho.

### 1.1 FALTAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Em um mundo totalmente dependente da energia elétrica, esta se torna elemento fundamental na vida e cotidiano dos cidadãos, sendo imprescindível para efetuar as tarefas mais simplórias do dia-a-dia. Logo, as faltas no Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) tem afetado fatores relevantes como a segurança, qualidade e confiabilidade (CHOW; TAYLOR, 1993).

Inúmeras são as razões para ocorrência de falhas em um SDEE, como curto entre linhas desprotegidas, curtos ocasionados por pássaros ou animais, acidente de trânsito, ou mesmo a influência de ventos e árvores. Certas faltas ocorrem por um curto intervalo de tempo, são a chamadas faltas transitórias, em outras a energia do sistema só será restabelecida quando a falha é identificada e solucionada, são as chamadas faltas permanentes (GURURAJAPATHY; MOKHLIS; ILLIAS, 2017).

Existe certa complexidade em identificar a causa que gerou a queda da energia elétrica, uma vez que as possibilidades são muitas. Diante disso, um sensoriamento de ativos da rede poderá identificar de uma forma mais rápida e objetiva a razão da falha, economizando tempo e força de trabalho para a recomposição do fornecimento de energia, além de evitar custos em compensação da distribuidora para com os clientes em razão da melhoria dos indicadores coletivos de continuidade.

### 1.2 SMARTGRID

A geração, a distribuição e a transmissão de energia elétrica estão em constante mudança diante do avanço tecnológico. Por consequência disto, está sendo implementado um novo modelo, chamado *Smart grid*, que pode ser descrito como a modernização da rede elétrica através do uso de tecnologias avançadas, envolvendo as áreas de sensoriamento, controle e comunicação (MOHSENIAN-RAD, 2022).

Nos locais que utilizam o fornecimento de energia convencional, a distribuidora de energia elétrica só terá conhecimento acerca da interrupção do serviço caso algum

usuário comunique. No entanto, com a implementação do *Smart Grid*, consegue-se ter conhecimento de falhas de forma imediata, uma vez que alguns componentes da rede podem ser monitorados em tempo real, a exemplo de transformadores e religadores, que, diante de anomalias, os operadores são capazes de corrigí-las ou atuar em manutenções preventivas.

Este modelo é capaz de trazer diversos benefícios ao setor de distribuição de energia elétrica, incluindo para o consumidor e para a distribuidora. Dentre eles estão a melhoria da eficiência operacional, a otimização dos equipamentos do sistema elétrico, a redução de custo de operação e de manutenção em todo o sistema, o autodiagnóstico e autoreparação da rede diante falhas. Para atingir esse modelo, as mudanças acontecem de maneira gradual. Por esta razão, a fim de obter uma parcela desses benefícios, equipamentos inteligentes estão sendo instalados na rede, como é o intuito do presente trabalho.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

A qualidade do serviço realizado em relação ao fornecimento de energia elétrica é medido através de indicadores de continuidade pela ANEEL, são eles:

- Indicadores Coletivos de Continuidade
  - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC)
  - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC)
- Indicadores Individuais de Continuidade
  - Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC)
  - Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC)
  - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC)
  - Duração da Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão (DICRI)

Os indicadores são enviados para a ANEEL pelas distribuidoras para a avaliação do serviço prestado através da continuidade. Tendo em vista a duração e a quantidade de vezes que uma unidade consumidora esteve sem energia elétrica em um período de um mês, um trimestre ou um ano. Quando esses valores ultrapassam o limite estabelecido pela ANEEL, as distribuidoras de energia precisam pagar aos consumidores taxas de compensação.

As informações de compensação são disponibilizadas pela ANEEL, com histórico

desde 2010. No ano de 2022, este valor já ultrapassa a marca dos 5 milhões de reais tendo como base a concessionária de energia do estado da Paraíba. Na figura 1, são apresentados os valores de compensação de continuidade do ano de 2021 e logo em seguida, na figura 2, os dados de compensação referente ao ano de 2022 até o mês de dezembro.

Figura 1 – Índice de compensação de continuidade 2021

Região NORDESTE					
EPB - 2021					
Compensações	DIC, FIC e DMIC			DICRI	Total
	Mensais	Trimestrais	Anuais	Mensais	
Quantidade das compensações	881.532	176.400	96.404	11.013	1.165.349
Valor das compensações (R\$)	3.668.234,30	379.979,14	420.618,32	129.174,59	4.598.006,35

FONTE: ANEEL (2022).

Figura 2 – Índice de compensação de continuidade 2022

Região NORDESTE					
EPB - 2022					
Compensações	DIC, FIC e DMIC			DICRI	Total
	Mensais	Trimestrais	Anuais	Mensais	
Quantidade das compensações	191.070	0	0	8.690	199.760
Valor das compensações (R\$)	4.854.394,03	0,00	0,00	184.415,99	5.038.810,02
<b>As informações para o ano corrente são parciais, pois o envio dos dados ainda não está completo</b>					

FONTE: ANEEL (2022).

Uma das causas do aumento nos indicadores coletivos de continuidade são os acidentes de trânsito. No Piauí, até o fim de setembro foram contabilizadas 484 ocorrências automobilísticas envolvendo postes em 2022, afetando pelo menos 400 mil unidades consumidoras. Isto corresponde a uma falta de energia equivalente a 46 minutos no estado (MARREIROS, 2022).

Tendo em vista os altos valores de compensação que as distribuidoras de energia elétrica são obrigadas a pagar aos consumidores todos os anos, equipamentos que tornem a rede mais inteligente são opções que auxiliam em melhores resultados dos indicadores coletivos de continuidade.

Segundo Capelini *et al.* (2016), foi realizado um estudo de caso em que foram necessárias 24 horas para identificar, por meio da técnica de divisão e conquista, a seção do circuito da rede em que ocorreu a falha.

Atualmente, as reclamações dos clientes vão sendo alocadas no sistema por nível de prioridades. À medida que as unidades consumidoras notificam à distribuidora uma falta de energia, a plataforma que recebe os protocolos de reclamações consegue fazer a associação de uma área geográfica que abrange as unidades consumidoras reclamantes à um possível equipamento que possa estar com defeito, para que só então uma equipe de campo possa ser deslocada até o provável local do defeito (CAPELINI *et al.*, 2016). Dessa forma, o monitoramento do estado de uma chave fusível em tempo real pelo Centro Operacional Integrado, poderá trazer benefícios em relação à agilidade em ações corretivas reduzindo o DEC. Da mesma maneira, o monitoramento do estado de uma chave fusível religadora poderá evitar o desabastecimento de energia em alguns consumidores, fazendo com que a distribuidora possa atuar em situações preventivas, reduzindo o FEC.

#### 1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um dispositivo de fácil instalação capaz de comunicar à distribuidora de energia elétrica o estado e a localização geográfica de determinado equipamento em um sistema supervisório, principalmente em caso de abertura de estágio da chave fusível ou mesmo da chave fusível religadora, mas também em caso de acidente de trânsito, detectar forte impacto no poste onde as chaves estão instaladas, contribuindo desta forma com os indicadores coletivos de continuidade de energia Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) exigidos pela ANEEL às concessionárias, assim como garantir a integridade física dos ativos instalados e dos postes, que também podem afetar a segurança pública.

Dessa forma, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Analisar o impacto e o potencial de uso do dispositivo proposto em aplicações práticas;
- Prototipar um dispositivo eficiente para a identificação do estado do estágio do equipamento, levando em consideração alguns fatores do ambiente real de utilização.
- Arquitetar uma comunicação sem fio para estabelecer um sensoriamento remoto;
- Emular um sistema supervisório para apresentar o estado atual do porta fusível em que o dispositivo foi instalado.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho possui a seguinte estrutura: No Capítulo 1 é apresentado um panorama acerca das faltas no sistema e como a tecnologia pode atuar de forma positiva diante desses desafios. No Capítulo 2 é relatado o embasamento teórico necessário para o entendimento mais claro da proposta discutida neste documento. No Capítulo 3 são mostradas informações e características técnicas dos materiais utilizados, além de toda metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema aqui proposto. No Capítulo 4 são descritos e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas nesse trabalho, bem como propostas de melhorias futuras visando um produto comercial do protótipo aqui apresentado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda o embasamento teórico necessário para o entendimento mais claro da proposta discutida neste documento.

### 2.1 PROTEÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

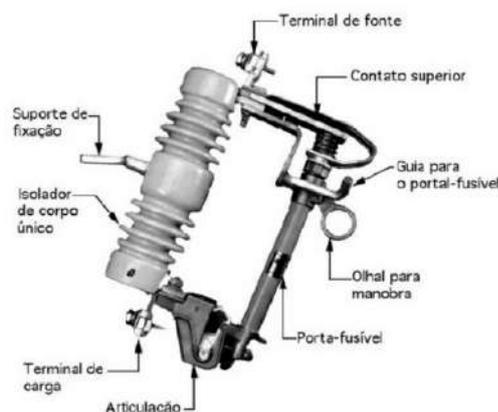
Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão sujeitos à falhas, sejam permanentes ou transitórias. Para amenizar os impactos que curto-circuitos, problemas em equipamentos ou outros fatores podem ocasionar no sistema e conseqüentemente aos clientes, existem dispositivos de proteção posicionados na rede em pontos estratégicos a fim de melhorar a confiabilidade do sistema e o fornecimento de energia aos consumidores (SILVA; PEREIRA; MANTOVANI, 2010). Podem ser eles, Chave Fusível / Elo Fusível, disjuntores, relés, religadores, seccionalizadores (LEME *et al.*, 2013).

#### 2.1.1 Chave fusível

A chave fusível é um equipamento destinado à proteção de redes aéreas de distribuição urbana e rural, assim como em pequenas subestações, contra sobrecorrentes de circuitos primários (FILHO, 2013).

As chaves fusíveis são constituídas de diversas partes mecânicas que podem ser observadas na figura 3. Dentre seus elementos construtivos podemos destacar alguns como o isolador, o porta fusível e o elo-fusível, sendo este último o acessório a determinar o nível de sobrecorrente na qual a chave irá atuar.

Figura 3 – Chave fusível



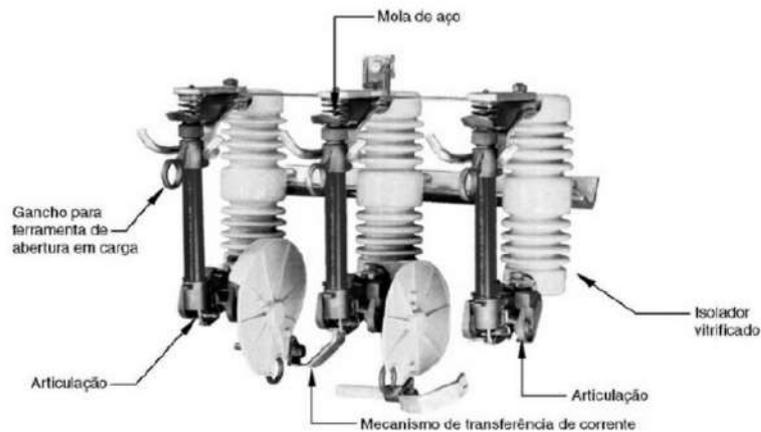
FONTE: Filho (2013).

Quando observado um curto-circuito, o calor gerado pelo excesso de corrente elétrica, rompe o elo-fusível, impedindo a passagem de corrente naquele ponto e protegendo os equipamentos a jusante (MOLLET, 1995).

### 2.1.2 Chave fusível religadora

A chave fusível religadora é usada em redes aéreas de distribuição, principalmente no alimentador tronco ou nas derivações importantes do mesmo. Ela é um tipo de chave fusível que apresenta uma construção especial destinada à proteção de curto circuitos transitórios (FILHO, 2013).

Figura 4 – Chave fusível religadora



**FONTE:** Filho (2013).

O uso de chaves religadoras reduz o tempo de falta de fornecimento de energia elétrica, principalmente em ocasiões em que seria de difícil acesso para atuar rapidamente, seja por não haver equipes suficientes ou pela falta acontecer em locais de difícil acesso.

## 2.2 CENTRO OPERACIONAL INTEGRADO (COI)

O Centro Operacional Integrado (COI), de maneira geral, refere-se a um conjunto de ativos e maquinários que em conjunto com uma equipe de operadores tem como função monitorar os equipamentos e funcionalidades que compõem a estrutura de atuação de uma empresa, tomando ações de forma direta ou indireta, ou seja, agindo remotamente para sanar ou mitigar problemas ou encaminhando as ações de reparo para equipes de campo atuarem.

Em uma distribuidora, o COI além da integração operacional, proporciona o monitoramento da rede elétrica, conseqüentemente traz maior eficácia às solicitações dos clientes (NEOENERGIA, 2022).

Este centro de operações tem como grande aliado um software como o SCADA, e é responsável por despachar as atividades das equipes de campo, organizando as demandas de maneira prévia e automática a partir do recebimento de solicitações, chamados e reclamações dos clientes dos diferentes tipos de canais que a distribuidora pode oferecer (SILVA, 2018).

Através da agilidade em despachos das ordens de serviço por priorizações, o COI, quando pertencente à uma distribuidora que investe em tecnologias na rede, possui uma maior autonomia em reestabelecer de forma remota a rede diante de uma falta no sistema, evitando, assim, maiores danos aos consumidores até que o problema seja inteiramente solucionado.

A figura 5 ilustra um centro operacional integrado de uma distribuidora de energia elétrica.

Figura 5 – Centro Operacional Integrado



**FONTE:** Neoenergia (2022).

### 2.3 SCADA OU SISTEMA SUPERVISÓRIO

O *Supervisory Control and Data Acquisition* - Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) faz parte dos sistemas de tecnologia de informação e comunicação com o objetivo de controlar, supervisionar e monitorar à distância sistemas industriais, dos mais diferentes tipos (SENDIN *et al.*, 2016).

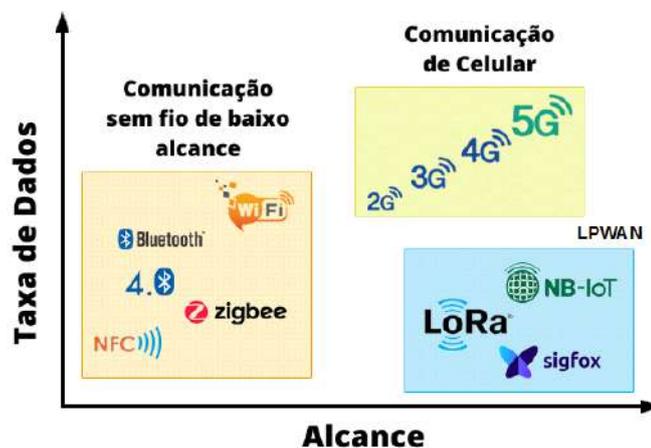
O sistema SCADA pode comunicar-se com equipamentos de campo por diversas formas, como por exemplo: link de rádio frequência, linha telefônica, cabo, fibra óptica ou satélite, desde que o sistema possua os requisitos e protocolos para essa comunicação. Dessa forma, é possível coletar informações e enviar para um centro operacional, onde o operador poderá consultar históricos de eventos e/ou informações sobre anomalias no sistema, além do monitoramento e controle de ativos à distância, como é o caso de empresas de distribuição e transmissão de energia elétrica (RAO; CHAKRAVARTHI; JAWAHAR, 2017).

## 2.4 COMUNICAÇÃO

A escolha do tipo de comunicação é de fundamental importância para a aplicação em campo do dispositivo proposto no presente trabalho. Alguns fatores importantes devem ser verificados, como cobertura, preço e alcance de transmissão. A taxa de transmissão não é um fator determinante para essa escolha, pois não existe a necessidade do conhecimento da mensagem enviada ser recebida de maneira instantânea.

Sistema de rádio frequência, fibra óptica, Zigbee, Wifi e redes de telefonia celular são formas de telecomunicações tecnológicas para redes de smart grid (SENDIN *et al.*, 2016). A figura 6 representa uma comparação em relação à taxa de transmissão e alcance entre tecnologias LPWAN e outras. Observa-se nessa figura que o alcance considerado na transmissão é ponto-a-ponto, uma vez que se considerarmos a rede de telefonia celular como um todo esta é maior esta é maior do que a transmissão via sistema LPWAN.

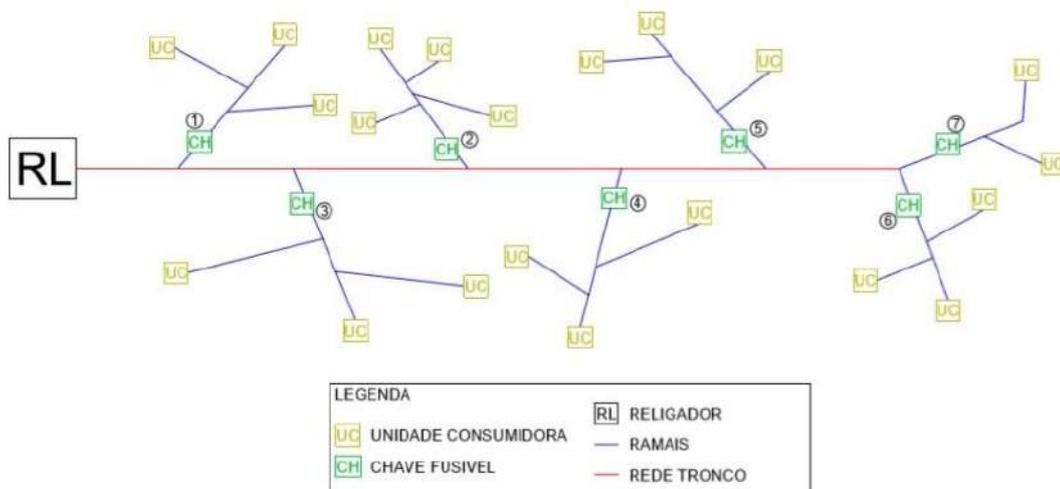
Figura 6 – Comparação entre redes de comunicação



FONTE: Adaptado de Kumar (2019).

A figura 7, ilustra o mapeamento de ativos da rede. Estes por sua vez, possuem um IP de identificação que além de fornecer características técnicas dos equipamentos presentes em cada ponto, possui também suas coordenadas geográficas, permitindo aos operadores o conhecimento do local exato de cada ativo.

Figura 7 – Diagrama simplificado de um sistema de distribuição de energia elétrica



**FONTE:** Drebes (2018).

Ainda na figura 7, pode ser observado que, que um equipamento como religador possui uma quantidade relevante de unidades consumidoras nele conectadas, por esta razão, se faz necessário uma comunicação de alta confiabilidade, sendo justificável um alto investimento no sistema de comunicação dos dados ao COI. Diferente de um equipamento como a chave fusível, em que abrange um ramo menor de consumidores, sendo capaz de ser aplicado um tipo de comunicação de menor custo, como o de telefonia celular.

O enlace via rádio frequência, é uma opção de comunicação segura e de confiança, cuja distribuidora de energia pode possuir uma topologia de rádio privativa, na qual a sua manutenção vai depender exclusivamente da própria distribuidora, assim como todas as estratégias de proteção que evitem a interrupção da transmissão de dados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda as técnicas utilizadas para a elaboração de um dispositivo e sistema para sensoriamento remoto do estado da chave fusível e/ou chave fusível religadora. Além de apresentar as descrições dos principais componentes utilizados para a construção do protótipo.

#### 3.1 MATERIAIS

Para a execução deste trabalho, foram utilizados diferentes equipamentos tais como: plataforma Arduino com o microcontrolador ATmega2560, sensor MPU-6050, módulo conversor de nível lógico bidirecional, módulo ethernet e o rádio GE MDS S4. Já no tocante aos testes em laboratório foi utilizada a chave fusível, ilustrada na figura 8, para redes de 15 kV sem elo fusível, uma vez que não é necessário haver uma conexão de carga para averiguação dos resultados obtidos.

Figura 8 – Chave fusível utilizada em testes



**FONTE:** Autoria Própria, 2022.

Nas subseções a seguir estão descritos os materiais que compõe o protótipo desenvolvido.

### 3.1.1 Controlador

No presente trabalho, foi utilizada a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Mega, ilustrada na figura 9, que é composta pelo chip do microcontrolador ATmega2560 e opera a uma frequência de 16 MHz de *clock*. A placa contém 54 pinos de entrada/saída digital, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), uma conexão USB, uma tomada de alimentação 5 VCC, um conector ICSP (conexão para ethernet shield) e um botão de reinicialização (ARDUINO, 2022b).

A programação da placa é realizada em um *Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE), onde o usuário será capaz de escrever e compilar utilizando uma linguagem de programação própria, que é baseada nas linguagens C e C++, além de, enviar o código para a placa Arduino através da conexão USB.

Figura 9 – Plataforma do Arduino Mega



FONTE: Arduino (2022a)

### 3.1.2 Sensor MPU 6050

Para identificação das aberturas dos porta fusíveis o componente utilizado no projeto foi o MPU-6050, por conter diferentes parâmetros de medição como velocidade angular e aceleração gravitacional, o que traria mais eficácia aos resultados do protótipo. Além dos dados citados, o módulo ainda conta com um sensor de temperatura.

O módulo MPU 6050, ilustrado na figura 10, possui 6 eixos integrados, sendo 3 eixos para o giroscópio e 3 para o acelerômetro, além de possuir um conversor analógico digital de 16 bits para cada eixo, tanto do giroscópio quanto do acelerômetro, totalizando 6 conversores.

O giroscópio possui escalas de  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , e  $\pm 2000^\circ/\text{s}$ , assim como o acelerômetro possui escalas de  $\pm 2\text{g}$ ,  $\pm 4\text{g}$ ,  $\pm 8\text{g}$ , e  $\pm 16\text{g}$ . A escala de cada sensor poderá ser escolhida por meio de programação no controlador escolhido.

Figura 10 – Módulo MPU 6050



FONTE: Eletrônicos (2022)

### 3.1.2.1 Protocolo I2C

O estabelecimento da comunicação entre a placa de prototipagem (arduino) e o sensor MPU 6050 é realizado através do protocolo de comunicação serial I2C, cujo barramento é composto por 2 pinos, o SDA e o SCL, responsáveis pela transmissão de dados e clock do barramento, além da alimentação que pode ser 3,3 V ou 5 V. Na sua configuração de funcionamento os dois pinos necessitam de resistores *pull ups* para obtenção de resultados esperados.

### 3.1.3 Módulo conversor de nível lógico bidirecional

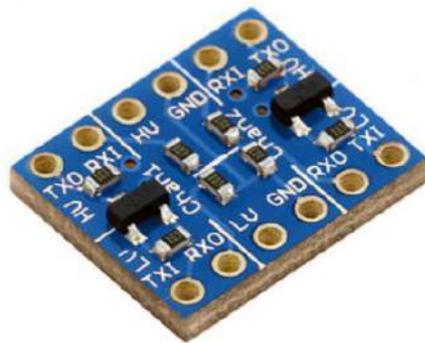
Os pinos de sinal do arduino atuam a uma tensão de 5 V enquanto os pinos do MPU6050 possuem um limite de tensão de 3,46 V em seus terminais, com exceção do Vcc, pois o circuito suporta a tensão de 5 V de alimentação.

Este Conversor de Nível Lógico Bidirecional tem como objetivo fazer a ligação entre dispositivos que possuam tensões de trabalho diferentes. Ele é capaz de abaixar ou de elevar as tensões, fazendo com que os componentes possam funcionar de maneira ideal.

Assim como indicado na figura 11, o módulo é composto pelos pinos TXI e TXO que são bidirecionais, ou seja, converte sinais tanto de 3,3 V para 5 V quanto de 5 V para 3,3 V, além dos pinos RXI e RXO que são unidirecionais, em outras palavras, um sinal de 5 V é conectado ao pino RXI, e terá sua tensão convertida para 3,3 V no

pino de saída, RXO. Por fim, o módulo possui os pinos das tensões de referência, sendo eles o HV (High Voltage ou alta tensão), o LV (Low Voltage ou baixa tensão) e o GND. Logo, a tensão de 5 V deverá ser injetada no pino HV, assim como a tensão de 3,3 V deverá ser injetada no pino LV para que o módulo possa atuar nas conversões de tensão corretamente.

Figura 11 – Módulo conversor de nível lógico bidirecional



FONTE: Eletrônica (2022).

### 3.1.4 Ethernet Shield

O módulo Ethernet Shield W5100, ilustrado na figura 12, permite o uso do Arduino em projetos IoT, conectando a placa de prototipagem à internet ou mesmo a uma rede local. Para tal finalidade, as conexões entre o shield e o arduino são feitas por meio do conector ICSP e do protocolo serial de comunicação SPI através de pinos empilháveis.

Figura 12 – Ethernet Shield W5100



FONTE: Eletrônicos (2022).

Este módulo ethernet, cujo controlador é o chip WIZnet W5100, opera nos modos de transmissão full duplex e half duplex e tem capacidade de suportar 4 conexões independentes simultâneas e suporta os protocolos TCP / IP, UDP, ICMP, ARP IPv4, IGMP, PPPoE, Ethernet (WIZNET, 2008).

Os dados do referido módulo são enviados através do cabo RJ45 para a internet ou rede local. No caso do presente trabalho, os dados serão transmitidos para uma rede local de maneira remota através do rádio detalhado na subseção 3.1.5.

### 3.1.5 Meio de Comunicação Remota

Dentre as tecnologias possíveis de comunicação remota entre os sensores e o COI (rádio frequência, fibra ótica, Zigbee, Wifi, redes de telefonia celular, satélite, etc.) optou-se por utilizar um sistema de rádio frequência que será aplicado por meio do rádio MDS S4 ilustrado na figura 13, fabricado pela General Electric. Segundo Energy (2022), este rádio possui diversas aplicações em indústrias, como de óleo e gás, de energia, de água e tratamento de água e de indústria pesada.

Figura 13 – Rádio GE MDS S4



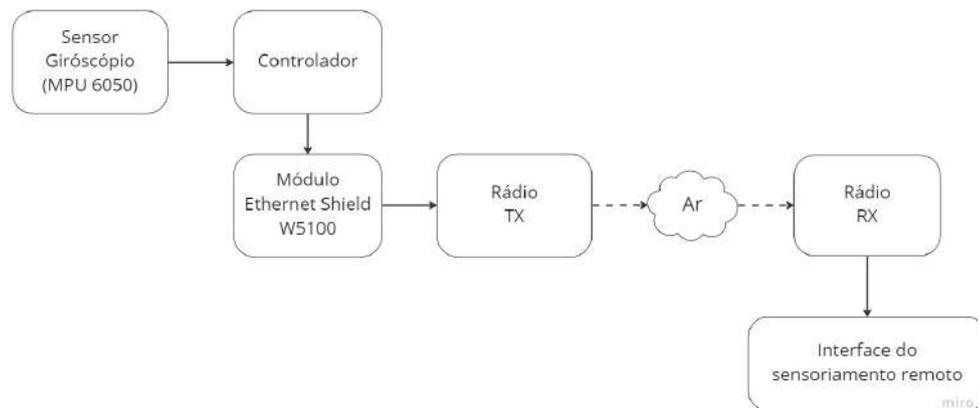
**FONTE:** Adaptado de Energy (2022).

O rádio GE MDS S4 opera na faixa de UHF em 417 MHz sendo compatível com vários protocolos industriais como Modbus, Modbus TCP e DNP3 que fazem parte da infraestrutura do SCADA.

## 3.2 SISTEMA PROPOSTO

Nesta seção, serão explorados todos os testes e procedimentos realizados durante a construção do presente trabalho, visando atingir o sistema ilustrado na figura 14 através de um diagrama em blocos.

Figura 14 – Arquitetura do sistema proposto



**FONTE:** A autoria Própria, 2022.

### 3.2.1 Sistema Transmissor Proposto

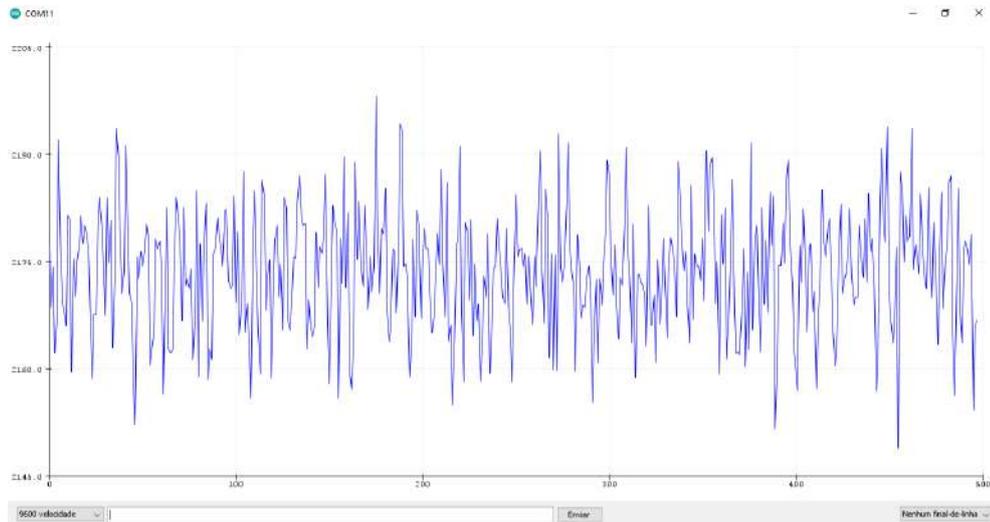
O sistema transmissor proposto é responsável por identificar o estado da chave fusível, seja ela religadora ou não, além de enviar esta informação por um sinal de rádio frequência na faixa de UHF para que seja feito o monitoramento remoto desse equipamento.

O circuito transmissor consiste em um sensor MPU-6050, responsável por fazer a leitura da velocidade angular; um módulo conversor de nível lógico bidirecional, que terá função de converter a tensão contida nos pinos do microcontrolador arduino ATmega2560 de 5 V para 3,3 V; e um módulo Ethernet Shield W5100, que, junto ao rádio GE MDS S4, é responsável por fazer a transmissão do estado do equipamento.

Para a montagem desse sistema, o primeiro passo foi realizar os testes com o sensor MPU-6050 e entender seu comportamento na prática. O circuito visto na figura 15 representa a ligação do sensor, cujos pinos funcionam em um nível de tensão de até 3,46 V, com exceção do seu pino de alimentação que opera a 5V (ELECTRONICS, 2013). Uma vez que os pinos do arduino mega operam a 5 V (ARDUINO, 2022a), faz-se necessário o uso de um conversor de nível lógico para adequar o nível de tensão utilizado de 5V para 3,3 V, atendendo os parâmetros do componente para assim garantir o seu funcionamento.

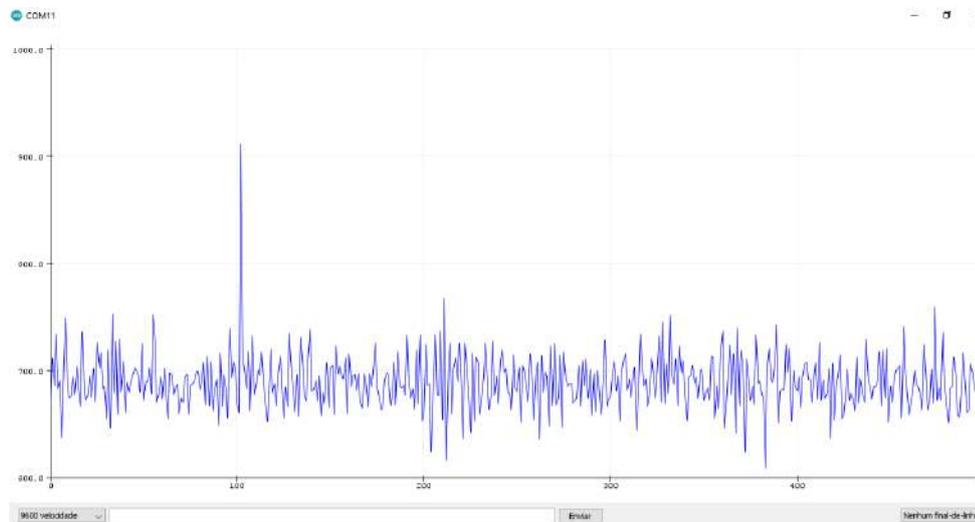


Figura 16 – Leitura do sensor acelerômetro em repouso



FONTE: Autoria Própria, 2022.

Figura 17 – Leitura do sensor giroscópio em repouso



FONTE: Autoria Própria, 2022.

$$Aceleração_{gravitacional} = \frac{2000}{2048}g \quad (3.1)$$

$$Aceleração_{gravitacional} = 0,98g \quad (3.2)$$

Onde, 2000 é a leitura do acelerômetro e 2048 é uma constante de conversão indicada no datasheet do MPU 6050 para a escala escolhida.

$$Velocidade_{angular} = \frac{700}{16,4} \quad (3.3)$$

$$Velocidade_{angular} = 42,68^\circ/s \quad (3.4)$$

Onde, 700 é a leitura do giroscópio e 16,4 é uma constante de conversão indicada no datasheet do MPU 6050 para a escala escolhida.

Após esses testes iniciais com o módulo sensor, foi percebido sua alta sensibilidade, o que poderá se tornar um fator impeditivo para o cumprimento do objetivo inicial, que é a identificação do estado da chave fusível. Para uma análise mais detalhada sobre a criticidade deste fator, foram realizados testes com o dispositivo, simulando a abertura da chave fusível, a fim de identificar uma taxa de alteração entre os valores lidos durante o repouso e durante a abertura através dos sensores giroscópio e acelerômetro. Por meio destes testes, foi possível verificar que o sensor giroscópio apresentou uma ampla faixa de variação de valores, além de uma resistência às interferências mecânicas simuladas em laboratório, tornando a leitura do sensor menos suscetível à ruídos. Logo, apenas a leitura do giroscópio está sendo levada em consideração para identificar o estado da chave.

Tendo em vista que o valor do sensor giroscópio em repouso foi aproximadamente 700, conforme demonstra a figura 17, e que o pico atingido durante a queda do porta fusível foi de aproximadamente 45000, conforme a figura 18. O valor da variação que detectará a abertura da chave fusível, nessa situação dos gráficos ilustrados nas figuras 17 e 18 é de aproximadamente 44.300, conforme demonstram as equações 3.5, 3.6 e 3.7.

$$threshold = Leitura_{Queda} - Leitura_{Repouso} \quad (3.5)$$

$$threshold = 45000 - 700 \quad (3.6)$$

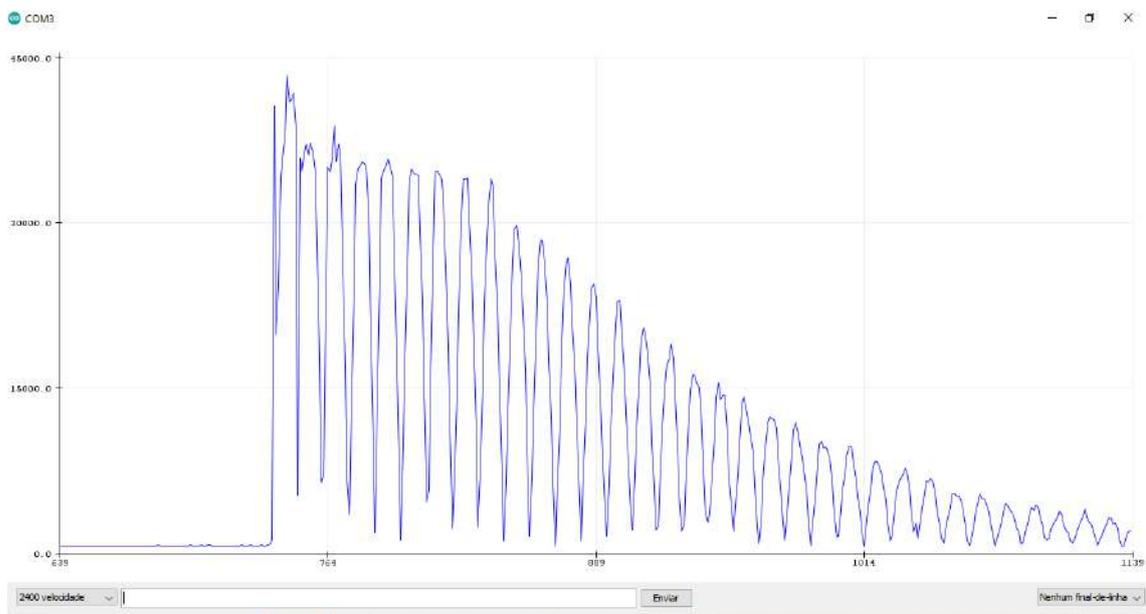
$$threshold = 44300 \quad (3.7)$$

Diante das outras situações avaliadas durante o teste, o valor limiar de variação foi estabelecida em 35000, considerando uma margem de erro de ao menos 9000, ou seja,

aquelas variações entre a queda e o repouso que são maiores ou iguais a 35000 fará com que o sistema identifique a abertura da chave. Visando diferentes ambientes de instalação do equipamento em campo, foi implementado no código uma calibragem do sensor para que o circuito, quando instalado, realize uma primeira leitura que reconheça seu estado de repouso naquela situação e identifique a condição da chave através da taxa de variação, anteriormente identificada durante os testes como threshold.

Vale ressaltar, que na forma de onda ilustrada na figura 18, o pico maior representa o movimento brusco causado pela abertura da chave fusível, enquanto os demais picos representam a movimentação pendular do porta fusível sustentado apenas pela articulação da chave, que é amortecida até o porta fusível deixar de se movimentar.

Figura 18 – Leitura do sensor giroscópio durante a abertura do Porta fusível



**FONTE:** Autoria Própria, 2022.

Uma vez atingido o limiar estabelecido, o circuito identifica a queda do porta fusível e inicia-se a etapa de transmissão dessa informação para o centro de operações. Foi acoplada à placa arduino um módulo ethernet shield para que inicialmente fosse possível estabelecer uma comunicação entre o computador e o arduino. Foi necessário criar uma rede local para que os dois equipamentos pudessem se comunicar. Para isso, através de uma calculadora de rede para IPV4, foi estabelecida a máscara de rede 255.255.255.48 e uma faixa de IP, que neste caso possui 6 IPs livres para o uso, como pode ser visualizado na figura 19. A porta ethernet do computador foi configurada para os parâmetros exibidos

na figura 20, bem como, para a visualização dos dados em uma página HTML, ilustrada na figura 28. Esta página foi construída por meio da programação do microcontrolador arduino, onde através do IP, foi possível ter acesso ao estado da chave fusível em tempo real.

Figura 19 – Calculadora de rede para IPV4

## Calculadora de rede para IPV4

A calculadora IP de sub-rede desempenha os cálculos de sub-rede para o bloco de endereço de rede fornecido, máscara de sub-rede, hosts máximos necessários por sub-rede e determina o endereço de transmissão, sub-rede, máscara curinga Cisco e intervalo de host.

Bloqueio de endereço de rede	Máscara de sub-rede	Número de hosts/sub-redes	Número de sub-redes
<input type="text" value="172.27.239.1/8"/>	<input type="text" value="255.255.255.248/29"/>	<input type="text" value="8"/>	<input type="text" value="2097152"/>
Intervalo de endereço de host	Endereço de difusão	Máscara curinga	Notações de CIDR
<input type="text" value="172.27.239.1 - 172.27.239.6"/>	<input type="text" value="172.27.239.7"/>	<input type="text" value="0.0.0.7"/>	<input type="text" value="172.27.239.0/29"/>

**FONTE:** (ENGINE, 2022).

Figura 20 – Configurações da entrada de rede do computador

Editar configurações de IP

Manuais ▼

**IPv4**

Ativado

Endereço IP

Comprimento do prefixo da sub-rede

Gateway

DNS Preferencial

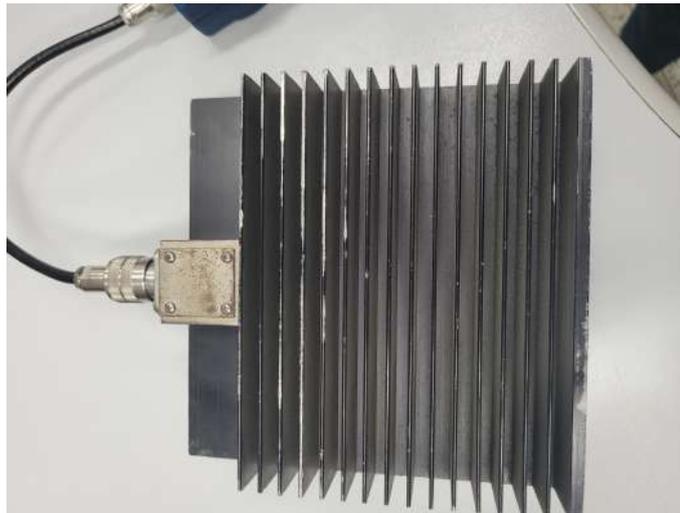
DNS Alternativo

**FONTE:** Autoria Própria, 2022.

Após essa etapa, os próximos testes foram realizados através da implementação do link rádio frequência, para simular o sensoriamento remoto do equipamento. Para isso, o rádio utilizado para transmissão foi alimentado pela fonte ilustrada na figura 22,

cuja tensão de saída é igual a 13,6 V. Em seguida, foi conectado no conector de saída de rádio frequência uma carga fantasma, ou *dummy antenna*, ilustrada na figura 21, para evitar-se que seja usado uma antena como carga do rádio, de modo a não expor as pessoas ao campo irradiado por esta. A carga fantasma evita que a potência gerada pelo rádio retorne para o mesmo, prevenindo danos ao equipamento.

Figura 21 – Carga Fantasma utilizada no sistema



FONTE: Autoria Própria (2022).

Figura 22 – Fonte utilizada no sistema de transmissão e recepção



FONTE: Autoria Própria (2022).

Devido a potência elevada do transmissor, 37 dBm, há uma pequena fuga de energia, que pode ser detectada a poucos centímetros da carga fantasma, mas é suficiente para estabelecer um link de rádio quando colocamos as cargas fantasmas do rádio transmissor e do rádio receptor lado a lado, conforme mostrado na figura 39. O rádio

transmissor, o qual podemos nomeá-lo como rádio escravo para que haja a possibilidade de ampliação de dispositivos monitorados ao mesmo tempo por um mesmo rádio receptor, que será chamado de rádio mestre.

O rádio escravo foi configurado com o IP: 172.27.239.5 e demais configurações conforme ilustra as figuras 23, 24, 25. Dentre esses parâmetros, vale ressaltar a frequência de transmissão em 417 MHz e a de recepção em 415 Mhz, além das características da rede local criada, como a máscara de rede, o *gateway* e o seu IP.

Figura 23 – Captura de tela 1 das configurações do rádio escravo



FONTE: Autoria Própria (2022).

Figura 24 – Captura de tela 2 das configurações do rádio escravo



FONTE: Autoria Própria (2022).

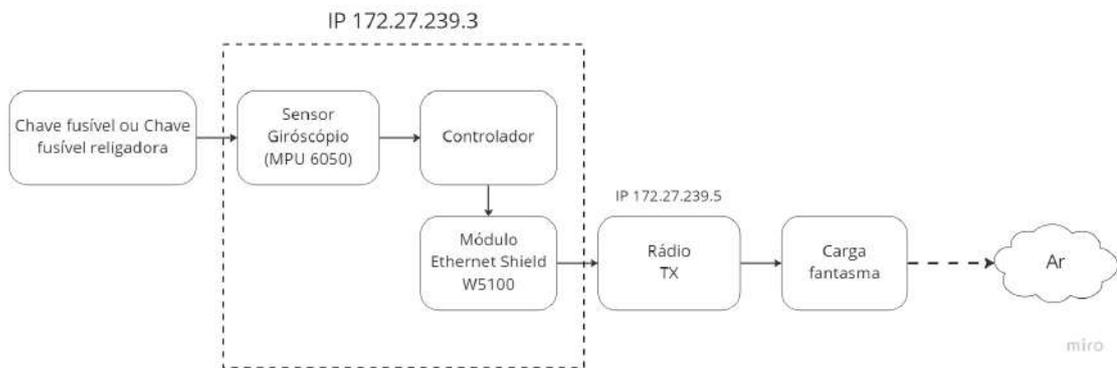
Figura 25 – Captura de tela 3 das configurações do rádio escravo



FONTE: Autoria Própria (2022).

Por fim, o rádio foi conectado ao módulo de ethernet shield, conforme pode ser visualizado através dos blocos ilustrados na figura 26.

Figura 26 – Sistema transmissor configurado com carga fantasma



FONTE: Autoria Própria (2022).

Vale salientar que, em um rádio enlace composto pelo rádio GE MDS S4 e a antena DIRU-140/10G ilustrada na figura 27 em ambos os pontos (transmissão e recepção) a estimativa de alcance seria de aproximadamente 50 Km a depender do terreno e alinhamento entre as antenas.

Figura 27 – Antena direcional utilizada no sistema



**FONTE:** Autoria Própria (2022).

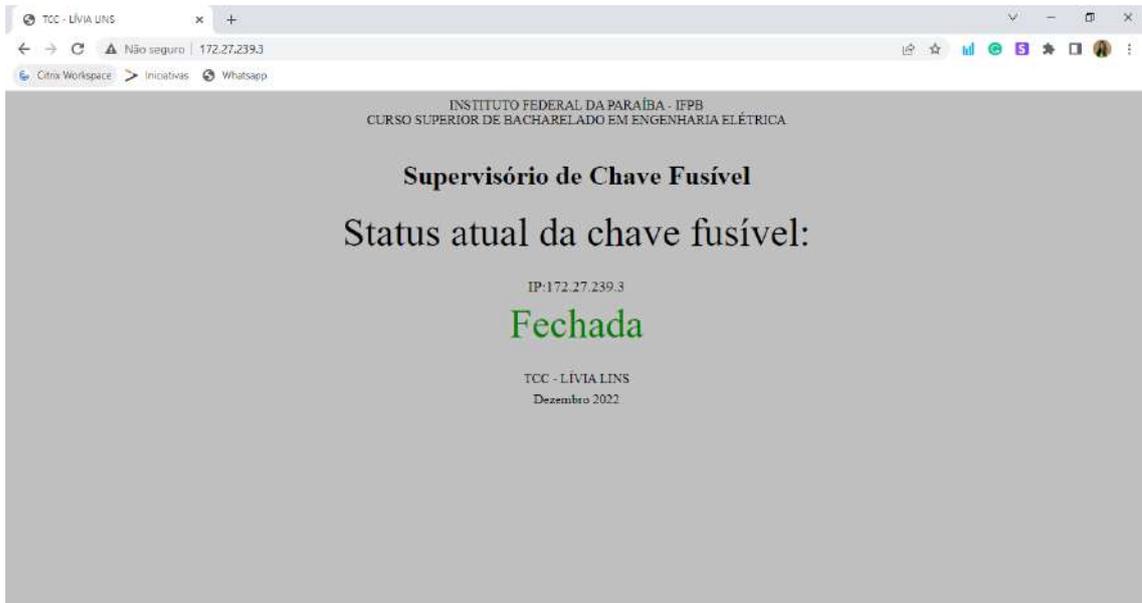
### 3.2.2 Sistema Receptor Proposto

Diante das informações já expostas no presente trabalho, faz-se necessário esclarecer, pela ótica do sistema Receptor, os testes anteriormente realizados na subseção 3.2.1.

Inicialmente, a leitura do giroscópio e do acelerômetro tinham como intuito entender o comportamento do sensor MPU 6050 em seu estado de repouso, que pôde ser visualizado por meio do gráfico que a própria IDE dispõe como ferramenta, vide figuras 16 e 17.

Para melhor visualização dos dados do sistema receptor criou-se uma página HTML, a qual mostra o estado da chave fusível através de uma conexão entre a shield ethernet acoplada ao arduino e o computador via cabo RJ45, assim como ilustrada na 28.

Figura 28 – Captura de tela da página HTML do status da chave fusível



FONTE: Autoria Própria (2022).

Com a transmissão da informação do status do equipamento validado, torna-se necessário o estabelecimento de uma comunicação sem fio. Para isso, foi utilizado um rádio de mesmo modelo ao do sistema de transmissão, o GE MDS S4, que também pode ser referido como rádio mestre ou rádio base, configurado com o IP 172.27.239.4, e demais configurações apresentadas nas figuras 29, 30, 31. Dentre estes parâmetros, vale ressaltar a frequência de transmissão em 415 MHz e a de recepção em 417 Mhz, respeitando as configurações do rádio escravo, para que haja a comunicação entre eles de modo ideal, além das características da rede local criada, como a máscara de rede, o *gateway* e o seu IP.

Figura 29 – Captura de tela 1 das configurações do rádio mestre



FONTE: Autoria Própria (2022).

Figura 30 – Captura de tela 2 das configurações do rádio mestre



FONTE: Autoria Própria (2022).

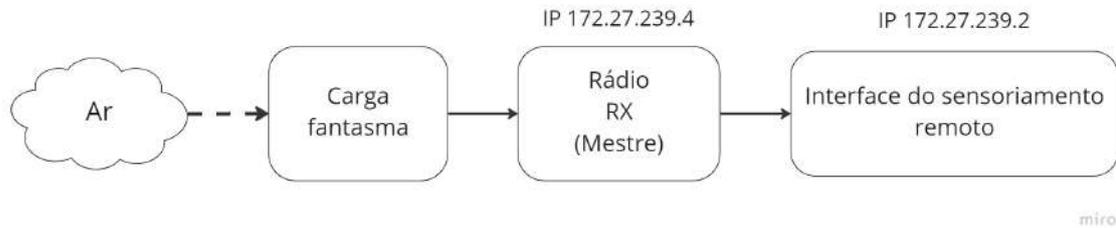
Figura 31 – Captura de tela 3 das configurações do rádio mestre



FONTE: Autoria Própria (2022).

O rádio receptor, assim como o transmissor, foi acoplado à carga fantasma, pelos mesmos motivos de segurança tanto do rádio quanto das pessoas próximas ao sistema, assim como demonstrado no esquema da figura 32. Vale ressaltar, que para uma transmissão de dados mais estável, a distância entre as cargas fantasma dos rádios transmissor e receptor, se deu em aproximadamente 5 centímetros.

Figura 32 – Sistema receptor com carga fantasma



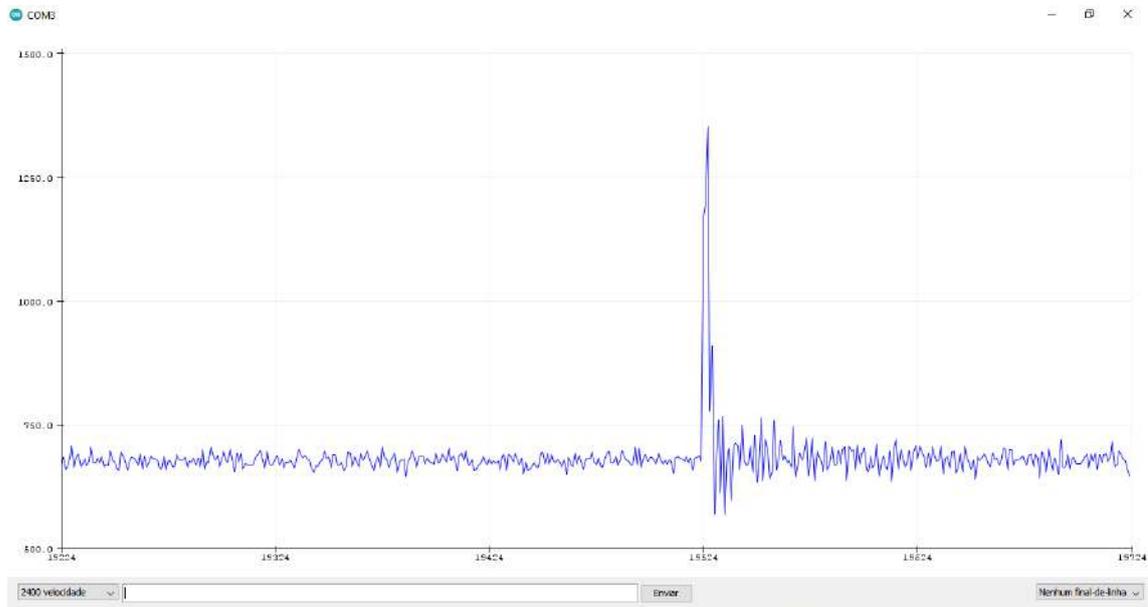
FONTE: Autoria Própria (2022).

### 3.2.3 Análise de Impacto ao Poste

O dispositivo proposto no presente trabalho acoplado ao porta fusível, tem como objetivo identificar a abertura de uma chave fusível seja ela religadora ou não e será analisada nesta subseção como uso em outra aplicação, qual seja: a identificação de impacto ao poste cuja chave está instalada. Esses impactos são, em sua grande maioria, provocadas em razão de acidentes de trânsito.

Os impactos foram simulados em laboratório através de ações de impacto contra o poste com uma marreta de 1 kg e movimentação manual da cruzeta. O reflexo dessas ações podem ser visualizados na figura 33, a qual indica que o pico da colisão atingiu um valor de aproximadamente 1300. Resultado que se manteve distante da identificação da abertura da chave, o que se torna uma oportunidade de utilizar o mesmo dispositivo para duas funções. Ao compararmos o resultado da abertura da queda do porta fusível, figura 18, com o resultado do impacto apresentado na figura 33, observamos que podemos diferenciá-los não somente pelo nível atingido, mas também pela existência do movimento pendular que acontece em ambas situações.

Figura 33 – Leitura do sensor giroscópio diante de um impacto



**FONTE:** Autoria Própria (2022).

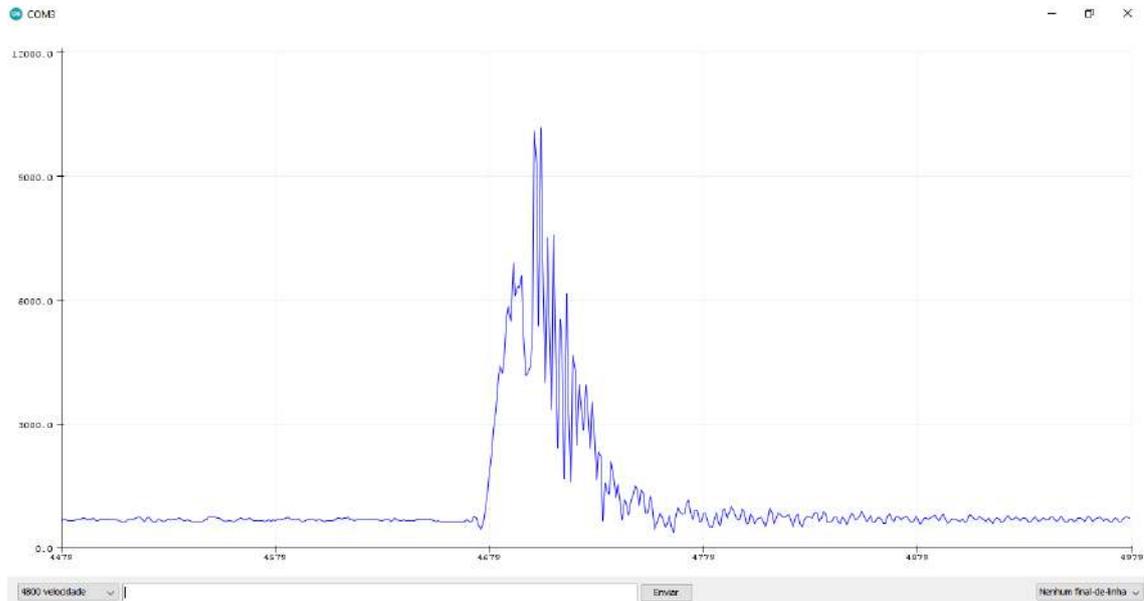
Diante deste resultado, foram realizados outros tipos de perturbação à estrutura, a fim de gerar um maior ruído analisar a eficácia da identificação do estado da chave em situações extremas. Para isso, foi realizada uma folga na fixação da cruzeta ao poste, como ilustra a figura 34, a fim de movimentá-la como uma espécie de gangorra, provocando uma maior variação na leitura do sensor giroscópio, cujo resultado pode ser visualizado na figura 35.

Figura 34 – Cruzeta com folga no eixo de fixação ao poste



**FONTE:** Autoria Própria (2022).

Figura 35 – Leitura do sensor giroscópio durante da movimentação da cruzeta



FONTE: Autoria Própria (2022).

Foi verificado um pico de aproximadamente 10000. Dessa forma, foi implementado no código do arduino e na página HTML um novo dado a ser supervisionado, o de identificação de impacto. As situações possíveis são observadas conforme as figuras 36, 37,38 .

Figura 36 – Captura de tela da página HTML do status da chave fechada e sem impacto identificado



FONTE: Autoria Própria (2022).

Figura 37 – Captura de tela da página HTML do status da chave fechada e impacto identificado



FONTE: Autoria Própria (2022).

Figura 38 – Captura de tela da página HTML do status da chave aberta e impacto identificado



FONTE: Autoria Própria (2022).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos testes apresentados no capítulo 3, foi possível reconhecer que a melhor forma de identificar a queda do porta fusível dentre as testadas com o sensor MPU 6050 é através da leitura do sensor giroscópio, feita pela soma vetorial da velocidade angular dos 3 eixos do sensor, onde foi possível verificar, com menos vulnerabilidade à ruído mecânico, o pico de variação, ilustrado na figura 18. Vale ressaltar que os demais picos decrescentes identificados na figura 18 se deram devido a movimentação do porta fusível após a queda. Devido ao código construído na IDE do arduino, essa oscilação não irá interferir na informação do estado da chave apresentado no sistema supervisor. Uma vez que, identificada a queda da chave, seu estado só retornará à fechado quando um botão de "*reset*" for acionado indicando que a manobra foi realizada e o seu estado de repouso foi restabelecido.

Em seguida, foi realizado o teste da comunicação entre a shield ethernet e o computador usado como receptor para exibir em HTML o estado da chave fusível, cuja programação foi realizada na IDE do arduino, junto a leitura do sensor.

Após, validada a etapa da comunicação entre o conjunto do arduino, sensor e shield ethernet ao computador, a próxima etapa foi legitimar o sensoriamento remoto, sem fio, do estado da chave fusível ou chave fusível religadora. Para isso, foi escolhido o rádio GE MDS S4, pela disponibilidade do equipamento, facilidade em implementar ao sistema e segurança da mensagem contida na comunicação.

Com essa finalidade, foi necessário configurar os parâmetros dos rádios utilizados para transmissão e recepção, alocando-os nos endereços de IPs disponíveis na rede criada. O teste da comunicação foi realizado com as cargas fantasmas instaladas nos rádios de transmissão e recepção, como ilustra a figura 39.

Figura 39 – Sistema transmissor e receptor com cargas fantasma

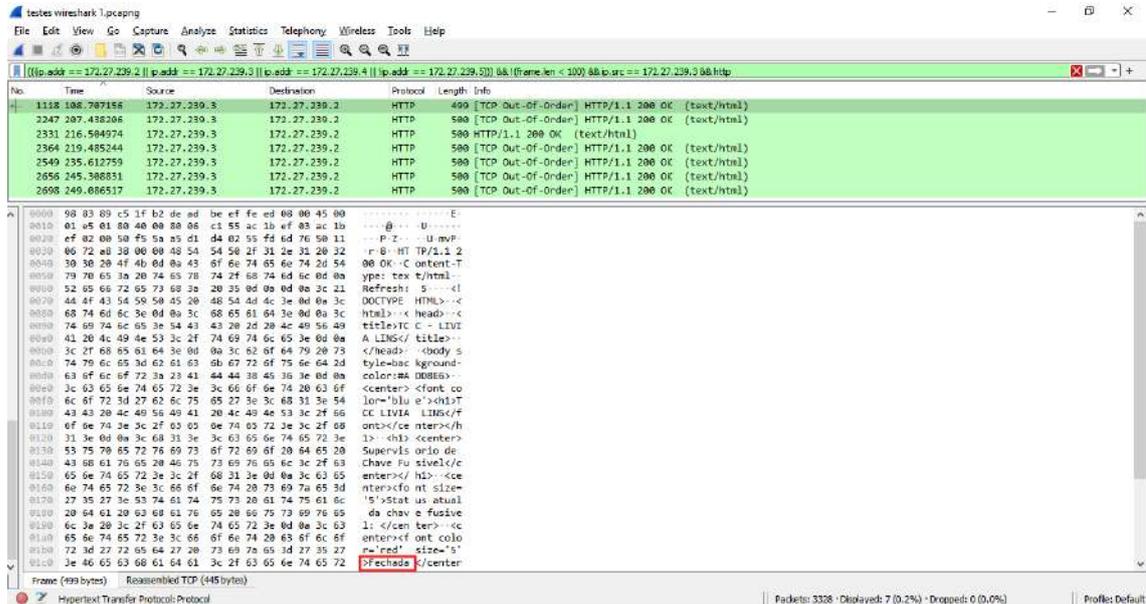


FONTE: Aatoria Própria (2022)

Esta comunicação teve êxito, porém, com um baixíssimo alcance (cerca de 5 centímetros) e com baixa estabilidade de sinal. Através deste teste, foi possível enxergar com mais clareza uma aplicação real em campo do protótipo aqui discutido, já que a abertura do monitoramento do estado da chave fusível ou chave fusível religadora está sendo monitorado através de um sistema supervisorio de maneira remota, mesmo que simulado.

A fim de demonstrar essa troca de informações entre a leitura do sensor e a página HTML remota, além da participação dos rádios no sistema, um software analisador do tráfego de rede foi utilizado. Na figura 40 é possível verificar que no instante 108.70 s o IP 172.27.239.3, referente ao conjunto transmissor, formado pelo sensor, controlador e shield ethernet está enviando uma mensagem para o IP 172.27.239.2 referente ao computador indicando que a chave está fechada.

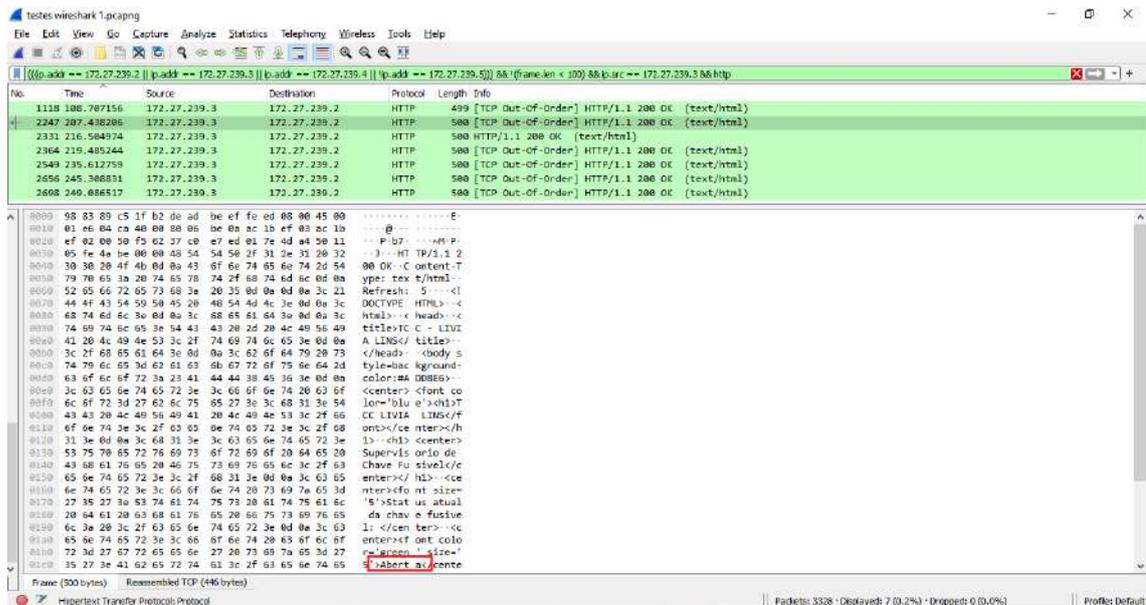
Figura 40 – Captura de tela 1 do software Wire Shark



FONTE: Autoria Própria (2022)

Logo após 100 segundos, no instante 207,44 s, a mensagem enviada é que o estado da chave foi aberta, como pode ser verificado na figura 41.

Figura 41 – Captura de tela 2 do software Wire Shark



FONTE: Autoria Própria (2022)

Da mesma forma, é possível evidenciar a existência do rádio escravo (IP 172.27.239.5) e do rádio mestre (IP 172.27.239.4) na topologia do sistema utilizado, através das figuras 42 e 43, respectivamente. Para isso, foi necessário utilizar uma função do

software Wire Shark que realiza o teste do canal de comunicação. Desse modo, foi identificada a comunicação entre o rádio escravo e o computador, que possui um maior tempo de comunicação em relação à comunicação entre o rádio mestre e o computador. Isso ocorre devido aos equipamentos (rádio escravo e computador) estarem separados fisicamente, diferente dos demais equipamentos (rádio mestre e computador) que estão conectados diretamente através do cabo ethernet.

Figura 42 – Captura de tela da Wire Shark - rádio transmissor

No.	Time	Source	Destination	Length	Info
3143	289.886385	172.27.239.2	172.27.239.5	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=96/24576, ttl=128 (reply in 3213)
3175	292.655115	172.27.239.2	172.27.239.5	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=97/24832, ttl=128 (reply in 3269)
3213	295.258188	172.27.239.5	172.27.239.2	74	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=96/24576, ttl=64 (request in 3143)
3236	297.659118	172.27.239.2	172.27.239.5	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=98/25088, ttl=128 (no response found!)
3269	306.836988	172.27.239.5	172.27.239.2	74	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=97/24832, ttl=64 (request in 3175)

FONTE: Aatoria Própria (2022)

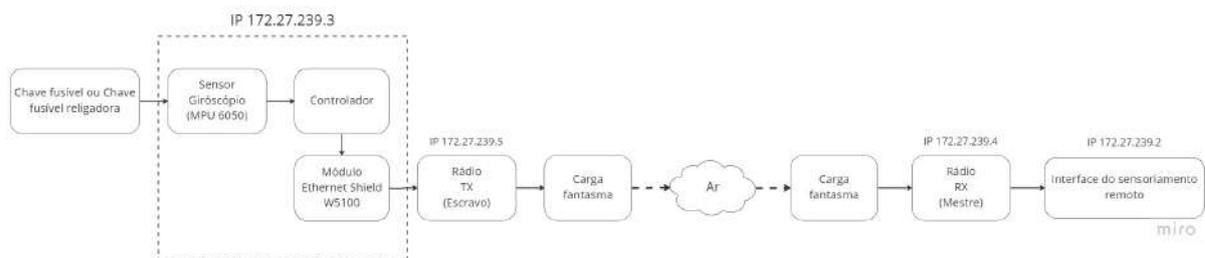
Figura 43 – Captura de tela Wire Shark - rádio receptor

No.	Time	Source	Destination	Length	Info
2998	276.878174	172.27.239.2	172.27.239.4	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=91/23296, ttl=128 (reply in 2991)
2991	276.878448	172.27.239.4	172.27.239.2	74	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=91/23296, ttl=64 (request in 2998)
3000	277.888979	172.27.239.2	172.27.239.4	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=92/23552, ttl=128 (reply in 3001)
3001	277.889377	172.27.239.4	172.27.239.2	74	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=92/23552, ttl=64 (request in 3000)
3012	278.986188	172.27.239.2	172.27.239.4	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=93/23808, ttl=128 (reply in 3013)
3013	278.986442	172.27.239.4	172.27.239.2	74	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=93/23808, ttl=64 (request in 3012)
3027	279.026807	172.27.239.2	172.27.239.4	74	Echo (ping) request id=0x0001, seq=94/24064, ttl=128 (reply in 3028)
3028	279.027277	172.27.239.4	172.27.239.2	74	Echo (ping) reply id=0x0001, seq=94/24064, ttl=64 (request in 3027)

FONTE: Aatoria Própria (2022)

Logo, a construção em blocos do sistema final pode ser representado pela figura 44.

Figura 44 – Sistema final proposto



FONTE: Aatoria Própria (2022)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visou a construção de um dispositivo capaz de identificar em tempo real o estado corrente de um porta fusível, de uma chave fusível ou de chave fusível religadora, bem como disponibilizar a informação em um sistema supervisório por meio de uma comunicação sem fio, com o objetivo de reduzir a duração e frequência de faltas aos consumidores finais de uma distribuidora, melhorando, desta forma, a eficiência operacional, os índices de continuidade e a satisfação dos clientes, além da redução de gastos por compensação.

De maneira geral, o protótipo desenvolvido apresentou bons resultados quanto à identificação do estado do equipamento supervisionado. O sistema proposto, quando plenamente implementado, poderá ser usado em aplicações de chaves fusíveis religadoras, onde poderão ser instalados de forma estratégica no segundo estágio, com o objetivo de despachar equipes de campo para identificar o problema e fazer a substituição dos elos fusíveis antes que o terceiro estágio se abra, prevenindo que consumidores sejam desabastecidos de energia elétrica.

Esta aplicação permite que a distribuidora faça manutenções preventivas ao invés de apenas corretivas. Com isso, tanto em chaves fusíveis de apenas um estágio quanto em chaves fusíveis de 3 estágios, este sistema facilitará a localização do dispositivo por ponto geográfico, além da identificação da sua fase de atuação. Tudo isso será possível através de um IP de identificação no supervisório por dispositivo que permitirá acesso direto à base de dados de ativos da distribuidora, onde estarão as coordenadas dos ativos, sua fase de instalação, além de outras características técnicas.

Aspirando melhorias futuras, o dispositivo deverá permitir mais de um tipo de comunicação como rádio frequência e GPRS, para que se adeque com maior facilidade às estratégias de aplicação de cada distribuidora de energia elétrica. Além disso, o sistema deverá ser capaz de fazer o encapsulamento da informação em algum protocolo de comunicação compatível com os softwares SCADA mais comuns para o envio de apenas uma *flag* (“1” chave aberta e “0” chave fechada) indicando o estado da chave, o que torna a comunicação menos complexa e menos suscetível a erros, devido ao tamanho reduzido do pacote enviado, como complemento a outro sistema supervisório, à exemplo do HTML aqui apresentado.

Outra indicação de melhoria é implementar um estudo mais detalhado acerca da

sensibilidade aos ruídos provocados por fatores externos e a maneira que podem interferir no sistema, bem como podem auxiliar em outras aplicações, como na identificação de um alto impacto no poste provocado por acidente de trânsito, a fim de auxiliar no envio de equipes de campo para a averiguação da integridade da instalação e garantir a segurança pública e a continuidade do abastecimento de energia elétrica para a população.

Por fim, realizar análises acerca da proteção do dispositivo em relação às descargas atmosféricas e ao efeito da indução eletromagnética da rede aos componentes eletrônicos do dispositivo.

Finalmente, pode-se concluir que o presente trabalho foi de extrema importância para o desenvolvimento pessoal e profissional da aluna, por trazer a visão de como assuntos de diferentes áreas são relevantes para a construção de soluções inovadoras que podem contribuir para melhorias na vida dos cidadãos, de empresas e satisfação de clientes. Além de criar o interesse na continuidade ao trabalho aqui proposto.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Compensação pela Transgressão dos Limites de Continuidade**. 2022. Disponível em: <<https://antigo.aneel.gov.br/indicadores-de-compensacao-de-continuidade>>. Acesso em 07/12/2022.
- ARDUINO. **Arduino Mega 2560 Rev3**. 2022. Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>>. Acesso em 16/11/2022.
- ARDUINO. **Arduino® MEGA 2560 Rev3**: Product reference manual. 2022. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/static/6401b3eb1b37ab149204eb5f9cc04d/A000067-datasheet.pdf>>. Acesso em 16/11/2022.
- CAPELINI, R. M.; FERRAZ, G. M. F.; SALUSTIANO, R.; NETO, E. T. W.; PEREIRA, M. L.; OLIVEIRA, R.; TESTI, R. D. Methodology for fast fault location in overhead distribution networks by the application of temporary georeferenced fault indicators. In: **2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.
- CHOW, M.-Y.; TAYLOR, L. S. A novel approach for distribution fault analysis. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 8, n. 4, p. 1882–1889, 1993.
- DREBES, F. **Método para localização de falhas na rede de distribuição de energia elétrica com o uso de equipamentos telecomandados**. Dissertação (B.S. thesis), 2018.
- ELECTRONICS, T. **MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2 MPU**. 2013. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132807/TDK/MPU-6050.html>>. Acesso em 06/10/2022.
- ELETRÔNICOS, F. C. **Ethernet Shield W5100 para Arduino**. 2022. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/ethernet-shield-w5100-para-arduino/>>. Acesso em 17/11/2022.
- ELETRÔNICA, B. da. **Conversor de Nível Lógico 3,3-5V Bidirecional**. 2022. Disponível em: <[https://www.baudaeletronica.com.br/conversor-de-nivel-logico-3-3-5v-bidirecional.html?gclid=Cj0KCQiA4OybBhCzARIsAlcfn9lBhBA44f-viuQx\\_nWR0\\_T5Q\\_-Fl6H795OgaFjgcG\\_etPIWW61nNmoaAr5BEALw\\_wcB](https://www.baudaeletronica.com.br/conversor-de-nivel-logico-3-3-5v-bidirecional.html?gclid=Cj0KCQiA4OybBhCzARIsAlcfn9lBhBA44f-viuQx_nWR0_T5Q_-Fl6H795OgaFjgcG_etPIWW61nNmoaAr5BEALw_wcB)>. Acesso em 20/11/2022.
- ELETRÔNICOS, F. C. **Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos 6 DOF MPU-6050: Movimento proximidade, sensores**. 2022. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/acelerometro-e-giroscopio-3-eixos-6-dof-mpu-6050/>>. Acesso em 02/12/2022.
- ENERGY, G. **MDS<sub>stm</sub> SD Series: Long range ip/ethernet serial sd1, sd2, sd4 sd9**. 2022. Disponível em: <[https://www.scadalink.com/products/pdf/MDS\\_SD4.pdf](https://www.scadalink.com/products/pdf/MDS_SD4.pdf)>. Acesso em 01/12/2022.
- ENGINE, M. **Calculadora de rede para IPV4**. 2022. Disponível em: <<https://www.site24x7.com/pt/tools/ipv4-sub-rede-calculadora.html>>. Acesso em 10/12/2022.
- FILHO, J. M. **Manual de equipamentos elétricos**. [S.l.]: LTC, 2013.

GUIMARÃES, F. **Acelerômetro MPU6050 com o Arduino: Circuito com um mpu6050.** 2018. Disponível em: <<https://mundoprojetado.com.br/acelerometro-mpu6050-arduino/>>. Acesso em 06/10/2022.

GURURAJAPATHY, S. S.; MOKHLIS, H.; ILLIAS, H. A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 74, p. 949–958, 2017.

KUMAR, A. **INTRODUCTION TO LORA TECHNOLOGY.** 2019. Disponível em: <<https://www.embien.com/blog/introduction-to-lora-technology/>>. Acesso em 05/12/2022.

LEME, D. M.; CUNHA, M. A. da; PITOCCO, T. A.; RIZZARDI, W. C. Sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica. **Monografia de Graduação. Universidade São Francisco. Itatiba**, 2013.

MARREIROS, L. **Faltas de energia por acidentes de trânsito.** 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2022/10/13/faltas-de-energia-por-acidentes-de-transito-envolvendo-postes-mais-que-dobraram-no-piaui-em-2022.ghml>>. Acesso em 10/12/2022.

MOHSENIAN-RAD, H. **Smart Grid Sensors: Principles and Applications.** [S.l.]: Cambridge University Press, 2022.

MOLLET, R. Overcurrent protection of dc power plant equipment using modern high performance current limiting fuses. In: **Proceedings of INTELEC 95. 17th International Telecommunications Energy Conference.** [S.l.: s.n.], 1995. p. 379–383.

NEOENERGIA. **Novo Centro de Operações da Neoenergia Coelba reúne em um mesmo espaço inteligência operacional da distribuidora.** 2022. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/novo-centro-operacoes-neoenergia-coelba.aspx>>. Acesso em 02/12/2022.

RAO, B. S.; CHAKRAVARTHI, C. V.; JAWAHAR, A. Industrial control systems security and supervisory control and data acquisition (scada). **International Journal for Modern Trends in Science and Technology**, v. 3, n. 10, p. 109–118, 2017.

SENDIN, A.; SANCHEZ-FORNIE, M. A.; BERGANZA, I.; SIMON, J.; URRUTIA, I. **Telecommunication networks for the smart grid.** [S.l.]: Artech House, 2016.

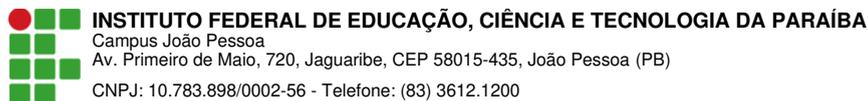
SILVA, L. G. W. d.; PEREIRA, R. A.; MANTOVANI, J. R. S. Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 21, p. 294–307, 2010.

SILVA, L. S. d. Análise do processo das equipes de operação de campo em uma distribuidora de energia elétrica. 2018.

WIZNET. **W5100 Datasheet: Version 1.1.6.** 2008. Disponível em: <[https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Arduino/W5100\\_Datasheet\\_v1\\_1\\_6.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/DevTools/Arduino/W5100_Datasheet_v1_1_6.pdf)>. Acesso em 17/10/2022.







## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### trabalho de conclusão de curso com ficha catalográfica

**Assunto:** trabalho de conclusão de curso com ficha catalográfica  
**Assinado por:** Livia Lins  
**Tipo do Documento:** Anexo  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Ostensivo (Público)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Lívia de Carvalho Campos Lins, ALUNO (20171610031) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 02/03/2023 09:26:29.

Este documento foi armazenado no SUAP em 02/03/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 763231  
Código de Autenticação: bd0c0464ee

