

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de São Carlos

PROTÓTIPO DE APARATO SENSORIAL PARA
MEDIÇÃO DE CORRENTE DE FUGA EM
ISOLADORES DE SUBESTAÇÕES DE
ENERGIA ELÉTRICA

ANA CLÁUDIA CARVALHO BARQUETE

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Ana Cláudia Carvalho Barquete

**Protótipo de Aparato Sensorial Para Medição
de Corrente de Fuga em Isoladores de
Subestações de Energia Elétrica**

**São Carlos
2024**

Ana Cláudia Carvalho Barquete

**Protótipo de Aparato Sensorial Para Medição
de Corrente de Fuga em Isoladores de
Subestações de Energia Elétrica**

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Ciências – Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica.**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos
de Potência.**

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

**São Carlos
2024**

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B223p Barquete, Ana Claudia Carvalho
Protótipo de Aparato Sensorial Para Medição de Corrente de Fuga em Isoladores de Subestações de Energia Elétrica / Ana Claudia Carvalho Barquete; orientador Ivan Nunes da Silva. São Carlos, 2024.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2024.

1. Isoladores elétricos. 2. Correntes de fuga. 3. Descargas parciais. 4. Poluição atmosférica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ANA CLÁUDIA CARVALHO BARQUETE**.

Título da dissertação: "Protótipo de Aparato Sensorial para Medição de Corrente de Fuga em Isoladores de Subestações de Energia Elétrica".

Data da defesa: 29/01/2024.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular Ivan Nunes da Silva
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Dr. Danilo Hernane Spatti

(Instituto de Ciências Matemática e de Computação/ICMC-USP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:

Prof Associado **Marcelo Andrade da Costa Vieira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”
(Paulo Freire)

Agradecimentos

Aos meus pais Ana Isabel e Carlos Henrique, por tornarem tudo isso possível.

Ao meu filho Vitor Hugo, pelo carinho, pelas alegrias diárias e pela parceria na vida.

A minha irmã Ana Luíza, pela amizade incondicional desde o primeiro dia de minha vida.

A minha amiga e colega Beatriz, pelo apoio, incentivo e pelos conselhos, na elaboração desta dissertação.

Ao meu orientador Professor Ivan Nunes da Silva, pelos ensinamentos, pela oportunidade e pela confiança depositada em mim.

Aos colegas de pesquisa do projeto de pesquisa e desenvolvimento dos Isoladores: Prof. Sofia, Victor, Prof. Rogério, Prof. Danilo, pela colaboração e ajuda neste projeto.

A ARGO Energia, pelo apoio financeiro ao projeto e ao Diretor Alexandre Fontes pelas conversas inspiradoras que muito contribuíram para este trabalho.

Índice

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
Capítulo 1. Introdução	21
1.1. MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DA DISSERTAÇÃO	21
1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	24
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	25
Capítulo 2. Principais Aspectos Relacionados aos Isoladores em Sistemas de Transmissão	27
2.1. INTRODUÇÃO	27
2.2. ISOLADORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	31
2.3. OCORRÊNCIA DE DESCARGAS EM ISOLADORES	37
2.4. POLUIÇÃO EM ISOLADORES DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	42
2.5. MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO DE ISOLADORES	45
Capítulo 3. Aspectos de Hardware do Protótipo	49
3.1. INTRODUÇÃO	49
3.2. ELEMENTOS DO APARATO DESENVOLVIDO	51
3.3. ASPECTOS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS	53
3.4. BOBINA DE ROGOWSKI E ELEMENTOS SENSORIAIS	57
3.5. ASPECTOS DO SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	62
Capítulo 4. Procedimentos Operacionais de Instalação e Validação do Protótipo	69
4.1. INTRODUÇÃO	69
4.2. INSTALAÇÃO DO APARATO SENSORIAL EM SUBESTAÇÃO PILOTO.....	69
4.3. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS PELO APARATO SENSORIAL	76
4.4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TENDÊNCIAS	77
4.5. ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS.....	79

Capítulo 5. Conclusões Gerais e Aspectos de Continuidade do Trabalho	83
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	83
5.2. ASPECTOS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO	84
5.3. TRABALHOS PUBLICADOS	85
Referências Bibliográficas	87

Resumo

Barquete, A. C. C. (2024). *Protótipo de Aparato Sensorial Para Medição de Corrente de Fuga em Isoladores de Subestações de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2024.

A investigação da detecção de avarias em isoladores de potência tem se voltado para as variáveis chaves envolvidas no processo de envelhecimento destes dispositivos. Sobretudo em ambientes com poluição ambiental severa, a degradação dos isoladores de maneira prematura traz riscos à operação do sistema, bem como prejuízos às concessionárias, as quais perdem receitas com desligamentos não programados ou manutenções executadas antes do período estabelecido pelos fabricantes. Para tanto, a quantificação do nível de poluição pode ser estimada por intermédio de vários métodos, tais como aqueles baseados na detecção de emissões luminosas e sonoras ou na medição de correntes de fuga. Assim, o principal objetivo deste trabalho é justamente a elaboração de um novo ferramental, a ser disponibilizado por meio de um aparato sensorial para medição de correntes de fuga em isoladores de subestações de energia elétrica. O sistema desenvolvido foi testado na prática em isoladores instalados em uma subestação piloto, sendo que as respostas foram bem positivas e promissoras. Assim, tais resultados podem também contribuir no processo que visa estimar o momento de se proceder com a manutenção preventiva no equipamento.

Palavras Chave: Isoladores elétricos, correntes de fuga, descargas parciais, poluição atmosférica.

Abstract

Barquete, A. C. C. (2024). *Sensory Apparatus Prototype for Measuring Leakage Current in Insulators of Electrical Power Substations* (Master's Degree) - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2015.

The investigation of fault detection in power insulators has focused on the key variables involved in the aging process of these devices. Especially in environments with severe environmental pollution, the premature degradation of insulators poses risks to the operation of the system, as well as damage to utilities, which lose revenue with unscheduled shutdowns or maintenance performed before the period established by the manufacturers. For this purpose, the quantification of the level of pollution can be estimated through various methods, such as those based on the detection of light and sound emissions or on the measurement of leakage currents. Thus, the main objective of this work is precisely the development of a new tool, to be made available through a sensory apparatus for measuring leakage currents in insulators of electric power substations. The developed system was tested in practice on insulators installed at a pilot substation, and the responses were very positive and promising. Thus, such results can also contribute to the process that aims to estimate the moment to proceed with preventive maintenance on the equipment.

Keywords: Electrical insulators, leakage currents, partial discharges, atmospheric pollution.

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
ATH	Alumina Tri-Hidratada
DDNS	Densidade Superficial de Depósito Não Solúvel
DDSE	Densidade Superficial de Depósito de Sal Equivalente
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
DP	Descargas Parciais
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
GPOS	General Purpose Operating System
I2C	Inter Integrated Circuit
IEC	International Electrotechnical Commission
LC	Leakage Current
LT	Linhas de Transmissão
MPU	Memory Protection Unit
PB	Pagamento Base
PV	Parcela Variável
PVA	Parcela Variável por Atraso na Entrada em Operação
PVI	Parcela Variável por Indisponibilidade
PVRO	Parcela Variável por Restrição Operativa
PWM	Pulse Width Modulation
RF	Radiofrequência
RTOS	Real Time Operating System
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SO	Sistema Operacional

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Estrutura de um isolador polimérico	30
Figura 2.2 – Exemplo de isoladores de pino	31
Figura 2.3 – Exemplo de isoladores tipo pilar.....	32
Figura 2.4 – Exemplo de isoladores de suspensão.....	32
Figura 2.5 – Processo de <i>flashover</i> em isoladores.....	35
Figura 3.1 – Kit do sistema LoRa-E5.....	49
Figura 3.2 – Arquitetura Sigfox.....	52
Figura 3.3 – Filosofia de comunicação do aparato sensorial.....	54
Figura 3.4 – Teste 1 (Distância de 387 metros)	56
Figura 3.5 – Teste 2 (Distância de 465 metros)	56
Figura 3.6 – Diagrama esquemático sobre as principais características da placa de aquisição.....	57
Figura 3.7 – Diagrama esquemático referente à bobina de Rogowski.....	58
Figura 3.8 – Bobina de Rogowski para monitoramento da corrente de fuga.....	59
Figura 3.9 – Modularização dos elementos sensores	60
Figura 3.10 – Plataforma base dos elementos sensores LoRa.....	60
Figura 3.11 – Conversor TSSOP-16	60
Figura 3.12 – Ilustração do microcontrolador STM32.....	61
Figura 3.13 – Ilustração do rádio LoRa formado pelo módulo Ra-02	61
Figura 3.14 – Gestão de sensores modulares.....	61
Figura 3.15 – Diagrama esquemático da placa de aquisição	62
Figura 3.16 – Diagrama da arquitetura Super Loop	63
Figura 3.17 – Diagrama da arquitetura RTOS.....	63
Figura 3.18 – Concorrência de tarefas na arquitetura RTOS	64
Figura 3.19 – Representação dos <i>beacons</i> na rede de sensores	65
Figura 3.20 – Linha do tempo da transmissão de <i>beacons</i>	65
Figura 3.21 – Acompanhamento com CubeMonitor	66
Figura 3.22 – Dashboard com a relação dos sensores conectados ao concentrador	66
Figura 3.23 – Significado dos rótulos do Dashboard com a relação dos sensores conectados ao concentrador	67
Figura 3.24 – Detalhes dos comandos enviados e recebidos pelo concentrador	67

Figura 3.25 – Detalhe do acompanhamento de cada sensor	68
Figura 4.1 – Esquemática de instalação do sensor de medição de corrente de fuga	69
Figura 4.2 – Arranjo de chaves seccionadoras invertidas nas quais foram instalados o protótipo do sensor.....	70
Figura 4.3 – Detalhe da instalação da bobina de Rogowski em uma das chaves seccionadoras	71
Figura 4.4 – Detalhe da instalação da bobina de Rogowski em uma das chaves seccionadoras	71
Figura 4.5 – Detalhe do cabeamento utilizado para a instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras	72
Figura 4.6 – Protótipo do sensor instalado no arranjo das chaves seccionadoras ...	72
Figura 4.7 – Detalhe da parte interna do protótipo do sensor instalado no arranjo das chaves seccionadoras	73
Figura 4.8 – Detalhes do processo de instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras (I).....	73
Figura 4.9 – Detalhes do processo de instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras (II).....	74
Figura 4.10 – Detalhes do processo de instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras (III).....	74
Figura 4.11 – Detalhes do funcionamento do protótipo do sensor instalado no arranjo das chaves seccionadoras e de sua comunicação com computador no centro de comando utilizando a comunicação LoRa	75
Figura 4.12 – Comportamento médio da corrente de fuga na fase A	76
Figura 4.13 – Comportamento médio da corrente de fuga na fase B	76
Figura 4.14 – Comportamento médio da corrente de fuga na fase C	77
Figura 4.15 – Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase A.....	78
Figura 4.16 – Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase B.....	78
Figura 4.17 – Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase C	79
Figura 4.18 – Qualificação do nível de descargas em função do dia.....	80
Figura 4.19 – Qualificação do nível de descargas em função do ano (2021 e 2022)	80
Figura 4.20 – Qualificação do nível de descargas desde o início da aquisição de dados.....	81
Figura 4.21 – Comportamento médio do nível de descargas em função das horas do dia.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação de regiões de acordo com a poluição	41
Tabela 3.1 – Detalhamento orçamentário do sensor de monitoramento de condição do sistema de isolamento	49
Tabela 3.2 – Detalhamento orçamentário do sensor de monitoramento de variáveis ambientais	50
Tabela 3.3 – Detalhamento orçamentário da unidade concentradora	50
Tabela 3.4 – Comparativo entre LoRaWAN e Sigfox	52
Tabela 3.5 – Parâmetros considerados nos testes de transmissão (1)	55
Tabela 3.6 – Parâmetros considerados nos testes de transmissão (2)	57
Tabela 3.7 – Conjunto de tarefas do sistema de monitoramento	64

Capítulo 1

Introdução

1.1. MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Um das causas mais comuns de interrupções, tanto na transmissão como na distribuição de energia elétrica, são as correntes de fuga nos isoladores, as quais são intensificadas em ambientes sob poluição industrial ou com atmosfera muito salina, tal como aquela encontrada no litoral [1].

Os isoladores elétricos mais empregados atualmente são à base de porcelana com o recobrimento de uma camada fina e contínua de esmalte vítreo, que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e elétricas [2,3].

Os circuitos aéreos de potência que operam em áreas poluídas estão sujeitos a falhas que são provocadas pela degradação de equipamentos, sendo o isolador um dos componentes mais afetados. De fato, os arcos elétricos provocados pela redução de seu desempenho produzem uma grande corrente de fuga que flui na superfície, danificando então permanentemente o dispositivo [4].

Devido à crescente demanda por energia, os sistemas de transmissão e distribuição também estão em expansão nos últimos anos, o que significa uma maior quantidade de isoladores presentes nas redes. Em [5], os autores destacam a grande importância deste dispositivo para os atuais sistemas elétricos de potência, especialmente os isoladores cerâmicos, devido às suas boas características mecânicas e elétricas a um custo acessível.

Um inconveniente desses isoladores é o fato de suas superfícies serem constituídas de óxidos metálicos que possuem alta energia ou alta molhabilidade. Essa característica pode ocasionar a formação de película de água que, se for contínua por toda a altura do isolador, é capaz de conduzir corrente e fechar um arco elétrico, fenômeno este conhecido como *flashover* [1].

Esse problema vem se agravando com o aumento da poluição ambiental e a crescente concentração das indústrias no litoral, pois a poluição e os sais com o decorrer do tempo vão se depositando sobre a superfície do isolador até alcançar uma concentração tal que, em um momento de chuva ou neblina, podem tornar a película condutora contínua e causar *flashover*.

Várias soluções vêm sendo adotadas para minimizar esse problema, destacando-se aqui três importantes linhas de atuação. A primeira delas é a inspeção e lavagem periódica dos isoladores para a retirada dos depósitos. Outra linha de pesquisa é aquela que visa aperfeiçoar os aspectos construtivos. Por fim, a última destaca-se o emprego de ferramentas que permitem estimar as condições climáticas propícias para o surgimento dos arcos elétricos.

No litoral brasileiro a prática da lavagem dos isoladores é uma das mais empregadas, devido à sua simplicidade e eficiência. Entretanto, conforme aspectos delineados em [1], os materiais que compõem os isoladores do tipo cerâmico tendem a acumular água, sendo que a prática periódica da limpeza pode facilitar o surgimento de correntes de fuga.

Por outro lado, segundo apontam os autores de [6], determinados contaminantes sólidos, se não retirados até uma concentração limite, apenas poderão ser removidos com a prática de raspagem, sendo então fundamental o processo de lavagem.

Fica evidente, portanto, que existe um tempo ótimo de inspeção e limpeza dos isoladores, em que se permite realizar a descontaminação sem comprometer a funcionalidade do dispositivo. Entretanto, estudos que abordem o tempo ótimo envolvendo a limpeza dos isoladores não são encontrados em literatura relacionada aos sistemas de transmissão de energia elétrica.

No campo de investigação de novos aspectos construtivos, destacam-se aqueles fundamentados em alterar a geometria do isolador, a fim de dificultar as correntes de fuga e facilitar a limpeza natural dos poluentes sobre sua superfície, a partir da ação do vento e da chuva, ou ainda, alterar o recobrimento superficial das peças [7,8].

Isoladores poliméricos também têm ganhando espaço em substituição aos cerâmicos, especialmente nos Estados Unidos, aonde tais dispositivos vêm sendo

empregados nas redes de transmissão há mais de 30 anos. O problema é a fraca resistência à degradação frente à insolação e intempéries, características estas que não podem ser desconsideradas nas regiões litorâneas brasileiras [9].

Nesta mesma linha de pesquisa destacam-se os isoladores híbridos, geralmente de porcelana recobertos com filmes de silicone, ou ainda, processos que permitam a aplicação de materiais poliméricos capazes de fornecer a estes dispositivos uma grande performance elétrica frente à presença de contaminantes [1, 7-8,10].

O *flashover* é provavelmente um dos fatores mais marcantes nas falhas de isoladores, acarretando em diminuição da qualidade de energia, confiabilidade do sistema e, também, aumento de perdas. Pesquisadores têm investigado há muitos anos tal fenômeno, buscando-se então modelos de correlação entre os níveis de tensão, número de isoladores e a densidade de poluição que desencadeiam a formação de arco na superfície destes dispositivos [11].

Já a terceira linha de pesquisa que visa à mitigação dos problemas envolvendo o *flashover* em isoladores consiste da estimação das condições que permitam identificar os níveis de poluentes, sejam eles advindos de contaminação salina ou de indústrias, capazes de comprometer o funcionamento deste dispositivo, sendo também fundamental conhecer os processos elétricos envolvidos com a formação dos arcos provenientes das correntes de fuga.

Neste contexto, verifica-se a necessidade de se conhecer o comportamento da corrente de fuga frente às condições climáticas e também de poluição, destacando-se ainda as investigações que buscam caracterizar as assinaturas elétricas dos sinais de arco na superfície dos isoladores, tais como aquelas apresentadas em [12-14].

Para tanto, em [15], os autores promovem um completo tratamento envolvendo a estimação de parâmetros de contaminantes, demonstrando todos os aspectos da confecção do modelo de estimação das condições salinas, aplicando-se a regressão linear. O modelo permite determinar o quão severa é a contaminação, bem como o melhor intervalo de manutenção dos isoladores. A maior contribuição desta proposta está na constatação dos autores de que os coeficientes negativos obtidos para o modelo linear de estimação apontam que a concentração de sal depositada nos isoladores aumenta com a diminuição das variáveis de entrada. Foram consideradas como entradas a temperatura, a umidade do ar, a direção do vento e a pluviometria.

Outros melhoramentos nos processos de estimação dos poluentes podem ser alcançados com a adoção de ferramentas inteligentes, destacando-se aquelas fundamentadas em redes neurais artificiais e sistemas de inferência *fuzzy*, tais como as propostas apresentadas em [16-19]. Tais ferramentas são promissoras na solução deste tipo de problemas, pois podem ser facilmente condensadas em algoritmos compactos e embarcadas em hardware após o processo de aprendizagem.

1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal dessa dissertação é o desenvolvimento de um protótipo de aparato sensorial de baixo custo para medição de correntes de fuga, as quais possam ocorrer na superfície externa de isoladores de subestações de transmissão de energia elétrica. Como decorrência desse trabalho, tem-se então o intuito de colaborar com os demais procedimentos que visam o monitoramento de contaminantes e poluentes aglomerados em sistemas de isolamento (isoladores, para-raios, buchas), visando-se, assim, identificar e sinalizar a necessidade de procedimentos de manutenção preventiva a fim de se evitar eventuais fugas de corrente que sejam elevadas.

Portanto, as principais contribuições frente ao desenvolvimento dessa dissertação de mestrado, visando-se a melhoria dos indicadores de disponibilidade, são as seguintes:

1. Disponibilização um aparato sensorial de baixo custo visando o monitoramento de correntes de fuga em isoladores de subestações de transmissão de energia elétrica.
2. Quantificação das correntes de fuga decorrentes da deposição de contaminantes em isoladores elétricos em estágios iniciais, ou seja, antes que haja a evolução para uma falta e, conseqüentemente, para uma sensibilização da proteção.
3. Colaboração para eventuais reduções de perdas quanto à indisponibilidade do sistema de transmissão frente às manutenções não programadas, ou seja, reduzir o impacto econômico imposto pela Parcela Variável (PV).

Em suma, vislumbra-se que todo o ferramental a ser disponibilizado possa contribuir para a melhoria dos indicadores de disponibilidade dos sistemas elétricos de potência.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A organização desta dissertação está organizada em 5 capítulos, conforme se segue.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica abordando os pontos mais relevantes envolvendo os isoladores instalados em sistemas de transmissão de energia elétrica.

O Capítulo 3 descreve os principais aspectos de hardware relacionados com o desenvolvimento do protótipo para monitorar a corrente de fuga em isoladores de subestações de transmissão de energia elétrica.

O Capítulo 4 aborda os procedimentos operacionais envolvidos com a instalação do aparato sensorial dentro das dependências de uma subestação piloto, assim como mostra os respectivos resultados advindos dele.

Finalmente, o Capítulo 5 reporta as conclusões relacionadas com o desenvolvimento da dissertação, assim como descreve algumas frentes de pesquisa que podem contribuir para a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Principais Aspectos Relacionados aos Isoladores em Sistemas de Transmissão

2.1. INTRODUÇÃO

A satisfação que os consumidores de energia observam de um sistema elétrico tem uma estreita ligação com dois aspectos envolvendo a qualidade de energia, ou seja, a continuidade do fornecimento e o cumprimento dos níveis pré-determinados de tensão e frequência. De fato, estes dois aspectos relacionam-se com a qualidade de energia do ponto de vista de serviço e do ponto de vista de produto, respectivamente [20].

Com a segmentação dos sistemas elétricos em setores, o de transmissão é aquele responsável pelo transporte da energia em níveis mais elevados de tensão, visando-se uma operação segura e contínua do sistema, à medida que interconectam as centrais geradoras às subestações de distribuição de energia elétrica. Este setor pode ter sua continuidade afetada por uma infinidade de fatores. Entretanto, é de grande valia destacar a ação de envelhecimento dos isoladores de potência como sendo uma das principais causas envolvendo desligamentos não programados, afetando-se assim a qualidade de serviço [21].

Os ambientes a que estes dispositivos estão submetidos, muitas vezes contaminados por poluição de diversos tipos, acabam por acelerar o processo de envelhecimento, ou ainda, favorecer o aparecimento de falhas, especialmente descargas parciais [22].

Como as técnicas de detecção do nível de severidade da degradação na maioria das vezes são realizadas por inspeções invasivas e que podem necessitar de desligamentos programados, observa-se então atualmente um crescente número de

propostas não invasivas de detecção de avarias que se fundamentam no monitoramento de variáveis ambientais e elétricas. Com o propósito de se alimentar uma ferramenta de inteligência computacional capaz de fornecer uma resposta agregadora de todos os aspectos envolvidos com a detecção da degradação dos isoladores, cada vez mais pesquisas estão então buscando resolver o problema com abordagens variadas, tais como estimação de parâmetros, classificação de padrões e até mesmo otimização, empregando-se, para tanto, de ferramentas com algum tipo de inteligência [23].

A adoção de tais estratégias advém do fato de que, operando em condições ambientais adversas, os isoladores podem apresentar comportamentos não esperados, ou ainda, falhas indesejáveis, fazendo-se com que as variáveis ambientais e elétricas sejam de fundamental importância de monitoramento [24].

Em um ambiente cada vez mais conectado, o conceito de *Smart Grid* aplicado aos sistemas de transmissão permite também abstrair que as informações passarão a estar disponíveis em volumetria e velocidade compatível com a Internet das Coisas, tornando-se então o monitoramento de grandezas locais ou de repositórios uma realidade, a qual não pode ser descartada para a produção de soluções visando à detecção prematura da degradação dos isoladores [25].

Desta forma, pode-se apontar que um Sistema Inteligente é o mais procurado quando é preciso o relacionamento de grandezas de diferentes abstrações, conceitos e quantificação [27-29].

A utilização destas técnicas exige um grande conhecimento de Ciência de Dados por parte dos desenvolvedores, pois a incorreta preparação ou relacionamento destas grandezas pode acarretar em propostas não confiáveis, ou ainda, não generalizáveis, fornecendo-se então respostas incompatíveis para determinada classe de problemas.

Por outro lado, é de interesse dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) que sua operação seja feita de forma que a relação entre custo e confiabilidade seja a melhor possível. Por este motivo, existem formas para o setor elétrico avaliar seu nível de confiabilidade. Para redes de distribuição, isto é feito por meio da verificação de indicadores coletivos de continuidade, DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade

Consumidora). Visando a confiabilidade, deseja-se que tais indicadores sejam os menores possíveis, indicando que os períodos de interrupção de fornecimento por parte da distribuidora foram reduzidos.

Em relação à transmissão de energia, o Módulo 4 das Regras de Transmissão, estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), aprovado pela Resolução Normativa N° 906/2020, define os indicadores para avaliar a qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações. Neste documento a ANEEL define o Pagamento Base (PB) da empresa de transmissão e três tipos de parcelas variáveis que podem ser deduzidas do PB caso a empresa apresente redução na qualidade do serviço. Tais parcelas são as seguintes:

- **Parcela Variável por Atraso na Entrada em Operação (PVA):** Parcela devida ao atraso na entrada em operação das instalações da transmissora;
- **Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI):** Parcela relativa ao desligamento programado ou outros desligamentos da rede de transmissão;
- **Parcela Variável por Restrição Operativa (PVRO):** Parcela cobrada pela redução da capacidade operativa das instalações da transmissora.

A qualidade do serviço da transmissão é avaliada com base na disponibilidade e na capacidade operativa das instalações de transmissão, de forma que, eventos de indisponibilidade e/ou diminuição da capacidade operativa com duração igual ou superior a 1 minuto são avaliados e as parcelas variáveis são aplicadas à empresa transmissora. Por este motivo, é então de vital importância que os equipamentos da rede de transmissão estejam operando corretamente, a fim de evitar interrupção do fornecimento de energia.

Dentre os equipamentos constituintes de Linhas de Transmissão (LT), os isoladores ficam expostos às condições ambientais adversas durante a sua operação, o que pode acarretar em seu mau funcionamento, tornando-os assim responsáveis por falhas que levam à interrupção do fornecimento de energia.

O principal motivo que leva ao mau funcionamento desses equipamentos é o acúmulo de contaminantes em sua superfície sendo que, em certos casos, este acúmulo pode levar a ocorrência de faltas severas. O acúmulo de contaminantes está

intimamente atrelado ao local de instalação das LT e com os aspectos físicos do isolador. Regiões industriais ou litorâneas, por exemplo, apresentam atmosferas com alto índice de contaminantes que podem ser nocivos para o correto funcionamento dos isoladores.

Por este motivo, primeiramente, é essencial selecionar corretamente o tipo de isolador que será utilizado em cada instalação. A norma IEC/TS 60815-1 [33] determina as diretrizes para a realização de estudos preliminares a fim de determinar a severidade da poluição do local, por meio de medições, dados históricos sobre isoladores na mesma localidade, simulações ou através de tabelas definidas pela respectiva norma. A partir desses estudos é possível determinar o melhor tipo de material e as dimensões adequadas do isolador.

Além disso, ao longo da vida útil do isolador, é necessário avaliar os níveis de contaminação dos isoladores, de maneira inteligente e sistemática, de forma a garantir a manutenção preditiva e evitar a interrupção no fornecimento de energia. Isto é necessário, pois embora as evidências indiquem que a performance de isoladores que foram corretamente dimensionados costuma ser adequada, vários fatores podem influenciar negativamente o desempenho do isolador ao longo de sua vida útil prejudicando seu funcionamento. Dentre esses fatores, pode-se citar a mudança no ambiente em torno do isolador, frente à instalação de uma nova região industrial, por exemplo, adicionando então novas fontes de poluição nas proximidades do isolador.

Outro fator que pode afetar o funcionamento dos isoladores é a poluição a longo prazo. Pode ocorrer, de inicialmente, um local ser classificado como “poluição leve” e, mesmo assim, após alguns anos de serviço, o isolador acumular gradualmente uma grande quantidade de poluição que pode vir a se tornar prejudicial. Ainda, mudanças extremas no clima podem causar interrupções no fornecimento de energia devido a padrões meteorológicos incomuns. Grandes tempestades que podem ocorrer e, repentinamente, causar severa poluição costeira. Ou em áreas do interior, em que longos períodos de seca, com pouca chuva, podem também causar um acúmulo incomum de poluição.

Por estes motivos, diversos métodos são definidos, não apenas para avaliar e determinar os níveis de contaminação ao longo da vida útil dos isoladores, como

também sistemas inteligentes de tomada de decisão que podem ser utilizados para otimizar processos de manutenção e substituição de tais equipamentos.

2.2. ISOLADORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Linhas de transmissão são compostas por três elementos principais, a torre de sustentação, os cabos e os isoladores. A torre consiste na estrutura física na qual são instalados os componentes da linha. Os cabos, por sua vez, são os condutores pelos quais a energia é transferida. Por fim, os isoladores constituem uma estrutura de sustentação para os cabos condutores, por este motivo, devem ser capazes de suportar os esforços mecânicos impostos pelo cabo e de prover o isolamento entre o cabo de alta tensão e a estrutura da torre, a qual se encontra aterrada.

Dentre as partes constituintes do sistema de transmissão, os isoladores são caracterizados como uma das partes mais frágeis; além disso, ao longo de sua vida útil, eles podem corresponder a cerca de 10% dos custos diretos de uma LT. O correto funcionamento dos isoladores é vital para garantir a qualidade do serviço de fornecimento de energia, considerando que seu mau funcionamento pode levar a problemas de interrupção de fornecimento, causando grandes prejuízos financeiros para as empresas do setor e para os seus clientes.

Isoladores em geral são aplicados a sistemas elétricos com a função de manter a distância de isolamento entre duas estruturas com potenciais elétricos diferentes. No caso das linhas de transmissão, o condutor que possui um determinado nível de potencial e a estrutura com outro nível de potencial de forma a impedir a circulação indesejável de corrente.

Ao se aplicar a uma linha aérea, um isolador eficiente deve ser capaz ainda de fazer o máximo uso do poder isolante do ar que o envolve, a fim de assegurar o isolamento adequado. Falhas em isoladores podem ocorrer tanto no interior do material que o compõe ou pelo ar que o envolve. Seu desenho deve ser concebido de forma a assegurar uma distribuição balanceada de potenciais e, conseqüentemente, dos gradientes elétricos no ar, com o objetivo de minimizar descargas elétricas superficiais. Devem ser duráveis quando em serviço, reduzindo-se a um mínimo o número de reposições no decorrer dos anos, e resistir bem aos choques térmicos a que estão submetidos pelas condições meteorológicas locais [30].

As superfícies dos isoladores devem ter acabamento capaz de resistir bem às exposições do tempo, mesmo em atmosfera de elevado grau de poluição em que haja a presença de óxidos de enxofre e outros reagentes. Os materiais comumente empregados para a fabricação de isoladores são a porcelana vitrificada, o vidro temperado ou materiais orgânicos isolantes, tais como os polímeros.

A utilização de materiais orgânicos como isolantes elétricos de alta tensão internos se iniciou na década de 1940. As primeiras gerações de isoladores poliméricos se depararam com problemas de trilhamento e erosão, porém, na década de 1950, com a aplicação da alumina tri-hidratada (ATH), estes problemas foram atenuados tornando o uso dos isoladores poliméricos externos viáveis, visto que o uso da ATH contribuiu para o aumento da resistência ao trilhamento e à erosão no material polimérico. Já a utilização dos isoladores poliméricos em linhas aéreas de transmissão teve início, de fato, na década de 1980, quando surgiu a sua primeira versão comercial [30].

Apesar de na época o custo do material polimérico ser mais elevado, as suas características mecânicas e elétricas propiciavam uma economia durante o período útil de vida, seja na instalação ou na manutenção do equipamento. A estrutura de um isolador polimérico é formada, basicamente, pelo núcleo, pelas saias, e pelas ferragens terminais, cada uma com suas respectivas funções, tal como apresentado na Figura 2.1.

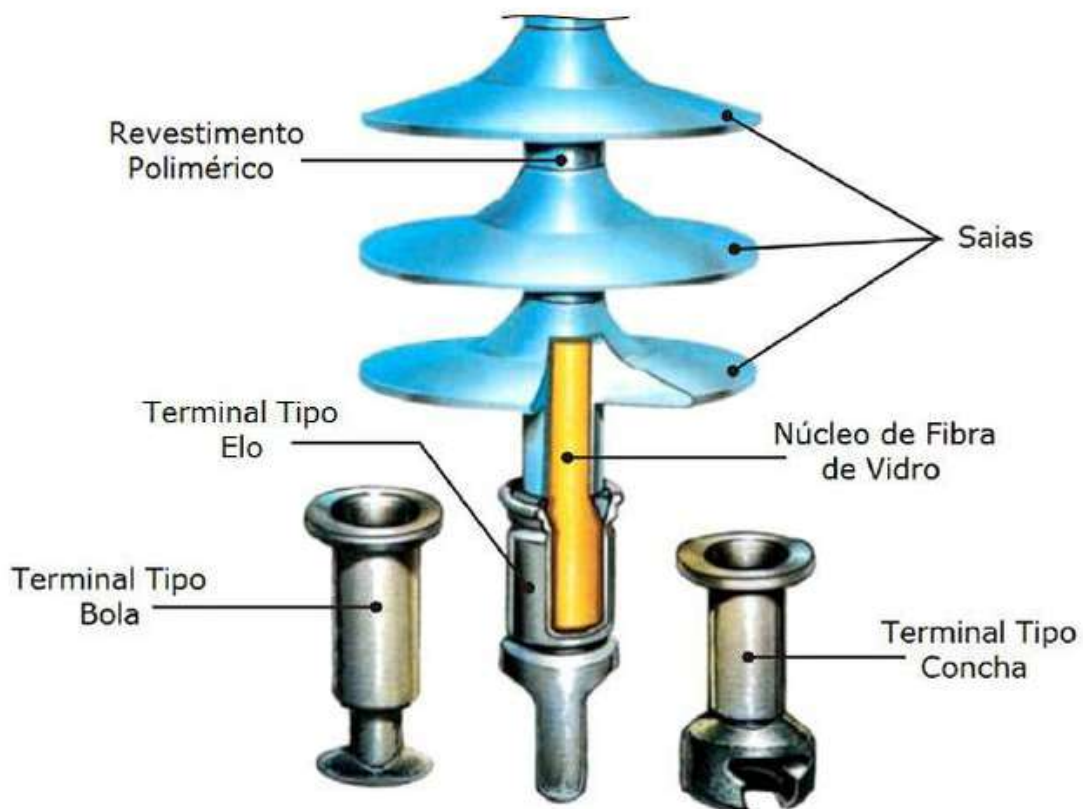


Figura 2.1 – Estrutura de um isolador polimérico.

Além da classificação devido ao tipo de material que compõe o conjunto isolante, podem-se classificar os isoladores com relação ao modo de instalação e funcionamento, ou seja:

- Isolador de pino;
- Isolador tipo pilar;
- Isolador suspensão.

Os isoladores tipo pino são fixados à estrutura por meio de um pino. Para tanto, em sua parte interna possuem um furo rosqueado para fixação às cruzetas através de um pino de aço cuja parte superior possui uma cabeça de chumbo filetada, sobre a qual se conecta o isolador. São normalmente solicitados à compressão e à flexão. São utilizados em linhas de até 69 kV e com condutores relativamente leves, em virtude da pequena resistência do chumbo na cabeça dos pinos ao esmagamento e também da pequena resistência dos próprios pinos a esforço de flexão. Alguns exemplos de isoladores do tipo pino são apresentados na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Exemplo de isoladores de pino.

Os isoladores tipo pilar são menos utilizados em linhas de transmissão do que os isoladores de pino, podendo ser construídos de uma única peça no caso de operarem em tensões mais elevadas. Dado ao seu sistema de fixação, eles resistem a esforços mecânicos bem mais elevados, tanto de compressão quanto de flexão [31]. Alguns exemplos de isoladores do tipo pilar são apresentados na Figura 2.3.

Os isoladores tipo suspensão representam o tipo de isolador com maior importância para as linhas de transmissão, sendo que alguns exemplos são exibidos na Figura 2.4. Empregam-se basicamente dois tipos desses dispositivos:

- Isoladores monocorpo ou barra longa;
- Isoladores de disco.



Figura 2.3 – Exemplo de isoladores tipo pilar.



Figura 2.4 – Exemplo de isoladores de suspensão.

Os isoladores monocorpo são constituídos de uma única peça de porcelana, cujo comprimento é de acordo com o nível de isolação desejada. Para um mesmo nível de isolamento, é sempre inferior ao das cadeias de isoladores correspondentes, o que pode resultar em considerável redução nas dimensões das estruturas.

Os isoladores de disco são compostos de um corpo isolante e ferragens de suspensão. Através dessas ferragens as unidades de isoladores são conectadas entre si, formando longas cadeias e quanto maior o número de unidades isolantes, maior será o nível de tensão possível a ser isolada.

O acúmulo de contaminantes na superfície do isolador tem maior relação com a forma, o tamanho e o acabamento do isolador do que com o seu material. O material do isolador tem influência sobre o processo de umidificação do mesmo, de forma que existem dois tipos principais de isoladores: isoladores com material hidrofílico, que consistem nos isoladores cerâmicos, e isoladores hidrofóbicos, que englobam os isoladores não cerâmicos ou poliméricos.

A performance do isolador frente à ocorrência de descargas é determinada principalmente pelas suas características físicas e pelas condições ambientais. Dentre os aspectos físicos principais dos isoladores, têm-se os discos que cobrem a sua superfície. Os discos que compõem os isoladores são essenciais para quebrar as colunas de água incidente sobre a sua superfície. Sem tais discos, a água iria escorrer ao longo do isolador por meio de caminhos verticais, tornando-o suscetível à ocorrência

de descargas elétricas. Desta forma, os discos dos isoladores funcionam como proteção para garantir que algumas partes da superfície do isolador permaneçam secas, melhorando a performance do isolador frente às descargas.

Além disso, a presença dos discos em isoladores externos garante a redução do estresse do campo elétrico ao longo do comprimento do isolador. Isso implica que o isolador tolera um nível maior de acúmulo de poluição antes da ocorrência de descargas. O estresse elétrico na superfície do isolador é dado pela tensão de operação do SEP dividida pela distância de escoamento do isolador. Sendo que, a distância de escoamento de um isolador representa a menor distância, ou a soma das menores distâncias ao longo da superfície isolante do isolador. Ela consiste em um parâmetro essencial, que é definido com base nos níveis máximos de contaminação esperados em um determinado local.

Existem três formas principais de classificar isoladores, de acordo com seu material, com sua aplicação ou com a natureza da carga mecânica que eles suportam. Em relação ao material, os isoladores podem ser do tipo cerâmico ou do tipo polimérico. O primeiro tipo trata de isoladores de porcelana ou de vidro. Esse tipo de isolador é composto de materiais cerâmicos que possuem fortes ligações químicas entre o silício e o oxigênio. Por este motivo, tais materiais são estáveis a altas temperaturas, além de serem muito resistentes. Todavia, tais isoladores possuem uma grande quantidade de energia livre em sua superfície, o que permite que isoladores cerâmicos sejam facilmente molhados e poluídos.

Os isoladores poliméricos, por sua vez, são formados por moléculas maiores que possuem ligações mais fracas. Além disso, eles podem entrar em decomposição em temperaturas relativamente baixas. Entretanto, tais desvantagens são relevadas frente ao fato de tais isoladores possuírem um baixo valor de energia superficial livre, o que lhes garante um comportamento hidrofóbico. Além disso, alguns materiais hidrofóbicos tendem a resistir ao acúmulo de contaminantes, o que é outra vantagem.

A classificação em relação à aplicação também divide os isoladores em duas classes, ou seja, isoladores de subestações e isoladores de linhas de transmissão ou distribuição. No primeiro caso, os isoladores são utilizados para suporte de cabos elétricos na proximidade de outros equipamentos, tais como transformadores de potência.

Isoladores de LT, por sua vez, são usados para sustentar os cabos condutores aéreos de torres. Ao contrário do que ocorrem com isoladores de subestações, que ficam confinados em um local específico, os isoladores de LT enfrentam condições ambientais diversas ao longo da extensão da LT e podem ter seu funcionamento normal prejudicado. Tais isoladores de LT, por exemplo, são expostos diretamente às descargas atmosféricas, que podem gerar sobretensões. Além disso, as LT podem atravessar áreas de alta contaminação, alta resistividade do solo, alta carga de vento, forte acumulação de gelo ou alto nível de atividade de pássaros.

Em resposta a essas incertezas de projeto, as concessionárias de eletricidade podem aceitar tolerar certo número de faltas fase-terra em linhas aéreas de transmissão e distribuição. Por fim, a classificação em relação à natureza da carga mecânica suportada separa os isoladores entre os que são utilizados para tensões típicas em LT, aplicados como isoladores de suspensão para suspender condutores de estruturas de linha, como torres e postes, e aqueles classificados como isoladores *dead-end*, que são usados em terminações e mudanças na direção da LT; e entre os isoladores que suportam uma combinação de compressão e torção, podendo ser aplicados tanto em LT quanto em subestações.

Em geral, independentemente de sua classificação, os isoladores são construídos de forma a possuir uma isolação dielétrica que fornece uma alta resistência à passagem de corrente e à ocorrência de descargas disruptivas (*flashovers*). Para tanto, os *flashovers* são definidos como descargas disruptivas que ocorrem no ar ao redor do isolador ou sobre a sua superfície. Eles ocorrem entre pontos com diferença de potencial e são produzidos pela aplicação de uma tensão em um caminho que está ionizado o suficiente para manter um arco elétrico. Os detalhes sobre o processo de *flashover* em isoladores serão abordados na seção a seguir.

2.3. OCORRÊNCIA DE DESCARGAS EM ISOLADORES

A ocorrência de descargas em isoladores está diretamente relacionada com as características da superfície do isolador, sendo que o fator mais importante é se esta superfície apresenta comportamento hidrofílico ou hidrofóbico. Quando submetidos a condições climáticas como chuva ou alta umidade, os isoladores com características hidrofílicas terão sua superfície totalmente umidificada, de modo que um filme de eletrólito cubra o isolador. Todavia, para superfícies hidrofóbicas, verifica-se a

formação de gotas de águas distintas na superfície do isolador. Os desdobramentos apresentados a seguir são contribuições das pesquisas apresentadas em [32-37].

Em isoladores com superfícies hidrofílicas, o processo de *flashover* ocorre conforme apresentado na Figura 2.5.

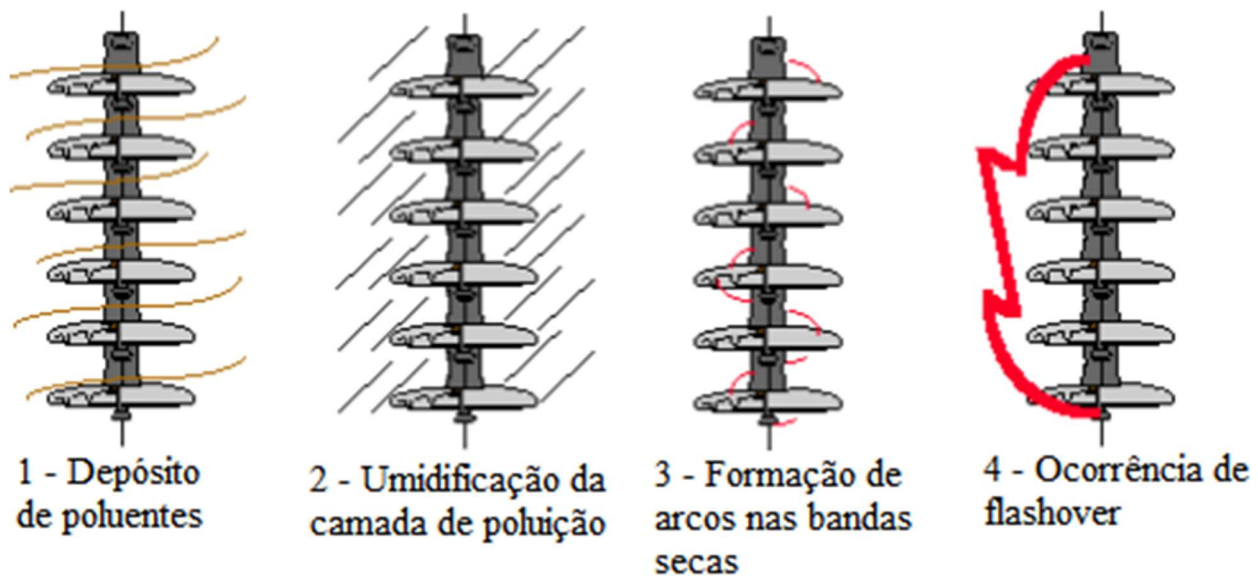


Figura 2.5 – Processo de *flashover* em isoladores.

Na figura 2.5, a primeira fase representa a deposição de poluentes, tais como sais solúveis, ácidos ou álcalis diluídos, sobre a camada do isolador. Os poluentes que se depositam sobre tais isoladores são carregados pelos ventos e seu depósito é feito de maneira estocástica.

Além disso, a deposição dos contaminantes é influenciada por diversos fatores, tais como a ocorrência de chuvas, a direção e a velocidade dos ventos, a localização da LT, entre outros. Ainda, atividades humanas realizadas nas localidades da LT também são relevantes, sendo que as regiões industriais têm grande influência no depósito de contaminantes sobre cadeias de isoladores.

Por este motivo, normalmente, os consumidores que sofrem mais prejuízos com a interrupção do fornecimento são os que também mais contribuem com tais interrupções, pois se tratam de clientes industriais cujas atividades favorecem o aumento dos níveis de poluição dos isoladores.

Esta camada de poluentes é definida como sendo constituída por substâncias que, quando dissolvidas em água, possuem comportamento condutor. Desta forma, a

presença de agentes umidificantes, como névoa ou chuva fina, pode tornar condutiva a poluição depositada na superfície do isolador (fase 2 da Figura 2.5) caso essa umidificação não remova os sais contidos na camada, como no caso de uma chuva forte, a qual pode lavar os isoladores completamente e impedir a evolução do processo de *flashover*.

Assim, o comportamento dielétrico da superfície é alterado quando ocorre o processo de umidificação da camada de poluentes. Nesta camada condutiva, uma corrente de fuga passará a fluir. O fluxo da corrente de fuga aquece regiões do isolador, devido ao efeito Joule, e ocasiona a evaporação da umidade em certos pontos de forma não uniforme, o que cria as chamadas bandas secas.

As bandas secas são definidas como pequenas regiões dielétricas circundadas por regiões condutoras que interrompem a passagem da corrente de fuga. A tensão fase-terra é então aplicada nessas faixas secas, que podem ter apenas alguns centímetros de largura. Isso acarreta numa ruptura dielétrica do ar em torno do isolador e essas bandas secas são unidas por arcos, os quais estão eletricamente em série com a resistência da porção não seca da camada de poluição (fase 3 da Figura 2.5).

Uma onda de corrente de fuga ocorre cada vez que as bandas secas em um isolador sofrem uma descarga. Além disso, quanto maior a camada de contaminantes e a umidade do ar, mais bandas secas surgirão provocando descargas parciais (DP) em diversos pontos da cadeia de isoladores.

Se a resistência da parte úmida da camada de poluição for baixa o suficiente, os arcos que fazem a ponte entre as faixas secas são então capazes de queimar continuamente e, portanto, podem se estender ao longo do isolador, abrangendo então mais e mais de sua superfície. Isso, por sua vez, diminui a resistência em série com os arcos, aumenta a corrente e permite que os arcos atravessem ainda mais a superfície do isolador. Esta situação pode evoluir de forma que, em último caso, o isolador é completamente afetado pelos arcos e uma falha de linha para a terra é estabelecida (fase 4 da Figura 2.5).

Os processos descritos anteriormente foram definidos para uma camada de poluentes formada por substâncias cuja condutividade estava atrelada à presença ou não de umidade. Todavia, no caso da poluição ser composta por uma camada líquida de eletrólitos, tais como spray salino formado por vento e névoa salina, o processo de

flashover ocorre de forma similar à descrita anteriormente, sendo que a única diferença é que o processo de umidificação não é necessário para a ocorrência do *flashover*.

Os processos anteriores foram descritos para isoladores com características hidrofílicas. Todavia, na prática, verifica-se uma superioridade na aplicação de isoladores poliméricos devido às suas propriedades hidrofóbicas. Estas propriedades impedem que a superfície seja coberta por uma camada de umidade, sendo que a água fica agrupada em gotas distintas.

Desta forma, para a mesma quantidade de poluição superficial, a resistência da superfície de um isolador polimérico é geralmente maior do que aquela de um isolador de porcelana ou vidro semelhante.

Além disso, também se verifica que as correntes de fuga associadas às descargas de isoladores poliméricos são geralmente mais baixas do que os níveis correspondentes para isoladores de cerâmica. Entretanto, diversos fatores podem levar à perda da hidrofobicidade de um isolador, tais como diferentes mecanismos de envelhecimento (umidade severa, ventos com areia, descargas corona e radiação solar).

No caso de isoladores com superfície hidrofóbica, por causa da natureza dinâmica da interação da superfície com diferentes tipos de poluentes e com agentes de umidificação, não existe então um modelo geral que possa ser adotado para representar a ocorrência de descargas decorrentes da poluição na superfície dos isoladores.

Todavia, um quadro qualitativo para o mecanismo de descarga devido à poluição está sendo desenvolvido. Este quadro envolve elementos como a migração do sal em gotas d'água, instabilidade das gotas d'água, formação de filamentos líquidos superficiais e desenvolvimento de descarga entre filamentos e gotas quando o campo elétrico é suficientemente elevado.

Contudo, quando em operação, os materiais hidrofóbicos são submetidos a um processo dinâmico de depósito de poluentes, umidificação, descargas localizadas ou elevado campo elétrico que podem se combinar para tornar parte ou toda a superfície temporariamente mais hidrofílica. Desta forma, considera-se que os aspectos principais definidos para o processo de *flashover* em isoladores hidrofílicos também podem ser

parcialmente e localmente aplicados para o processo de *flashover* em isoladores hidrofóbicos.

Nota-se que não apenas a presença de poluição determina a ocorrência de *flashovers*, como também o tipo de material que compõe o isolador. Com base na Figura 2.5, infere-se que os dois primeiros processos são afetados por fatores ambientais da região na qual o isolador está instalado, enquanto que, aspectos elétricos do próprio isolador e de seus materiais definem os dois últimos processos, ou seja, a formação de arcos e a ocorrência de *flashover*. Por este motivo, diversas normas determinam procedimentos específicos para determinação do tipo de isolador que será utilizado em cada instalação, pois cada material responderá de forma diferente frente à poluição e à ocorrência de descargas.

A ocorrência de arcos na superfície de isoladores, por exemplo, é um dos fatores que levam ao acontecimento de *flashover* e da degradação do material do isolador. Em isoladores poliméricos, a ocorrência de arcos pode gerar ranhuras e erosão na superfície do equipamento. No caso de isoladores de cerâmica, a falha do equipamento em função dos arcos elétricos ocorre devido à elevada corrosão que é causada no material. A ocorrência de arcos nos isoladores também acelera seu envelhecimento.

No caso de isoladores poliméricos, as ranhuras geradas pelos arcos reduzem a força mecânica do isolador, enquanto que a corrosão dos isoladores de cerâmica gera uma redução em sua capacidade dielétrica. Com este envelhecimento, a tensão de *flashover* dos isoladores de cerâmica é reduzida e eles se tornam mais propensos à ocorrência desse fenômeno.

Em função do tipo de material que caracteriza o isolante – vidro, porcelana ou polímero – a presença da poluição pode levar à degradação do material, especialmente no caso dos isoladores poliméricos, afetando-se a característica mecânica do isolador e possibilitando a queda da linha. Atualmente, o uso de isoladores poliméricos aumentou em linhas de transmissão. Neste tipo de isolador, a ocorrência de descargas parciais causa alterações físicas e químicas que ocasionam o surgimento de fissuras em sua superfície. Posteriormente, as Descargas Parciais (DP) se concentram em tais fissuras, ampliando os efeitos térmicos, aumentando-se a fissura e causando a erosão do polímero.

Testes efetuados sob chuva artificial com isoladores em borracha de silicone recobertos com uma camada de poluição artificial mostraram que seus desempenhos dependem da taxa de precipitação pluviométrica. Sob chuva forte, a resistência superficial diminuiu nos primeiros instantes, mas tornou a aumentar, rapidamente, devido à lavagem da camada de contaminação. Sob chuva leve, a resistência superficial diminuiu mais lentamente e permanece baixa por muito mais tempo.

Finalmente, sob névoa, obtiveram-se valores mais baixos e com tendência a permanecerem constantes. A tensão suportável dos isoladores aumentou de maneira correspondente ao aumento da resistência superficial, à medida que se elevou a taxa de precipitação da chuva, devido ao efeito da lavagem superficial. Sob névoa, observou-se que a tensão suportável dos isoladores de silicone foi, em média, de 20% a 70% superior àquelas dos isoladores de porcelana e de vidro, quaisquer que fossem os teores de contaminação.

Em testes efetuados sob chuva, porém, a suportabilidade dos isoladores de porcelana e de vidro foi igual àquela dos isoladores de silicone, devido à rápida lavagem da camada de poluição pela água da chuva, que pareceu ser mais eficiente no caso dos isoladores cerâmicos. Além disso, medidas do teor de poluição realizadas por vários anos mostraram haver, sempre, um maior depósito de poluentes em isoladores de silicone em comparação aos de porcelana. Este resultado foi atribuído à superfície aderente dos isoladores de silicone, devido à existência de componentes de baixo peso molecular que migraram para a superfície do material.

Na próxima seção, os tipos de poluição que podem afetar o funcionamento geral de isoladores serão analisados, levando-os à ocorrência de *flashovers*.

2.4. POLUIÇÃO EM ISOLADORES DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

A poluição pode ser definida como um conjunto de substâncias ou energia que são introduzidas no meio ambiente e podem causar danos à saúde humana, aos ecossistemas e recursos naturais, ou aos ativos, como aqueles dos sistemas elétricos de potência. Esta poluição pode ser causada não apenas pela ação humana, como na geração de energia por meio da queima de combustíveis fósseis, mas também por intermédio de fontes naturais, tais como a salinidade proveniente de oceanos que pode causar a corrosão de metais. Para os sistemas elétricos de potência, ao longo prazo, a poluição do ar pode causar a corrosão de componentes de metal e isolantes [38-40].

Além disso, ao curto prazo, a poluição é também responsável pelas ocorrências de *flashovers*, interrupções de fornecimento de energia e falhas em isoladores, prejudicando-se então o desempenho elétrico do sistema e a sua confiabilidade.

Diferentes tipos de contaminantes são capazes de reduzir a capacidade de isolação de isoladores, sendo que os mais nocivos são os solúveis em água. Dentre estes contaminantes solúveis, podem-se ser citados os bicarbonatos, nitratos e os sais de sódio, como cloro, potássio e magnésio. Já os não solúveis são gesso di-hidratado, quartzo, calcita, ferro, alumínio. Os poluentes solúveis são mais nocivos, pois quando expostos à água, eles se dissociam em íons fazendo com que a camada de poluentes se torne condutiva.

Segundo a norma IEC/TS 60815-1, a qual define os procedimentos para a seleção e o dimensionamento de isoladores para alta-tensão que irão operar sob condições de poluição, esta poluição que afeta os isoladores pode ser caracterizada em dois tipos básicos, sendo esses os seguintes:

- **Poluição do Tipo A** – Caracterizada pela presença de duas componentes principais, ou seja, poluição solúvel e poluição não solúvel. A primeira, composta de sais de alta e baixa solubilidade, se torna condutora quando há umidade sobre a superfície do isolador, enquanto a segunda, composta por partículas de poeira, areia, argila, funciona como uma camada de fixação para a poluição solúvel. Este tipo de poluição é mais frequentemente associado com áreas do interior, desérticas ou com poluição industrial. Todavia, ela também pode ser observada em regiões litorâneas, em que nesses casos é verificada uma camada seca de sal que pode se tornar condutora através da ação de umidificação de névoas, neblinas ou chuvas leves.
- **Poluição do Tipo B** – É caracterizada pela deposição de eletrólitos líquidos sobre a superfície do isolador, de forma que existe uma parcela mínima ou inexistente de componentes não solúveis. Este tipo de poluição é verificado principalmente em regiões litorâneas, onde a névoa salina pode se depositar na superfície do isolador.

Além de definir os tipos de poluição, a norma também classifica as regiões de acordo com suas características típicas de poluição. Essa classificação define 5 classes, que são resumidas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação de regiões de acordo com a poluição.

Região	Características da poluição
Região Desértica	<ul style="list-style-type: none"> - Camada de poluentes: Poluição do tipo A, sais de lenta dissolução e alto nível de componentes não solúveis; - Poluição carregada pelo vento; - Limpeza natural: Chuvas, pouco frequentes, e jateamento de areia.
Região Litorânea	<ul style="list-style-type: none"> - Localização: Costa litorânea ou até 50 km dentro do continente; - Camada de poluentes: rápido acúmulo de poluentes do tipo B, névoa salina. Devido ao oceano, verifica-se a presença de elementos como Na, Cl, Mg, K, e outros sais marinhos na atmosfera; - Deposição de poluição causada pelo spray formado pelo vento e a névoa; - Ao longo prazo pode ocorrer a deposição de poluentes do tipo A, sais de rápida dissolução e componentes não solúveis, trazidos pelo vento; - Limpeza natural é eficaz, devido à rápida dissolução dos sais.
Região Industrial	<ul style="list-style-type: none"> - Camada de poluentes: constituída de partículas condutivas como carvão, depósitos metálicos, gases dissolvidos, tais como NOx, SOx (Tipo B) ou poluição que se dissolve lentamente como cimento, gesso (Tipo A); - A eficácia da limpeza natural depende do tipo de poluição presente; - Deposição da poluição nas superfícies horizontais dos isoladores.
Região Agrícola	<ul style="list-style-type: none"> - Cama da de poluentes: sais com dissolução rápida ou lenta, como produtos químicos, fezes de pássaros, sais presentes no solo e produtos resultantes de queimadas; - A efetividade da limpeza natural depende do tipo de sal depositado.
Região do Interior	<ul style="list-style-type: none"> - Áreas com baixos níveis de poluição; - Fontes típicas de poluição não caracterizadas.

O nível de poluição em um local pode ser quantificado por meio da taxa de variação do depósito em superfícies expostas. Esta taxa depende da fonte de poluição e do tempo de exposição. Regiões onde a fonte de poluição é pontual podem apresentar altas taxas de depósito que decaem com o aumento da distância em relação à fonte. Em contrapartida, fontes de poluição regionais (que ocupam uma grande área), tais como o oceano ou grandes complexos industriais, apresentam elevadas taxas de deposição que não podem ser atribuídas a uma fonte única.

De acordo com [37], existem dois tipos principais de processos de deposição de poluição na superfície de isoladores. O primeiro consiste na deposição seca, a qual consiste na deposição de íons que se tornam condutivos quando em contato com a água. O fluxo de deposição seca pode afetar ambas as superfícies (superiores e inferiores) do isolador, quando causado pelo fluxo de vento. Quando causada pelo efeito gravitacional, esta deposição tende a afetar as superfícies do isolador voltadas para cima.

O outro tipo de deposição consiste naquela oculta, a qual ocorre devido à ocorrência de precipitações como chuva e neblina, que podem carregar íons eletricamente condutivos, além de fornecer umidade para dissolver a poluição já existente na superfície do isolador.

Paralelamente, o nível de poluição na superfície de um isolador depende de dois processos, ou seja, o de acúmulo de poluição e aquele de limpeza. A chuva é um agente natural de limpeza de isoladores; desta forma, os maiores níveis de poluição em isoladores são atingidos imediatamente antes da ocorrência de uma chuva que lavará os isoladores.

Alguns fatores ambientais determinam o acúmulo de poluição em isoladores, ou seja, a concentração de poluentes no ar, a velocidade da poluição através da superfície do isolador, a orientação da superfície em relação ao vento e os padrões de fluxo de ar em torno das saias do isolador, o tipo de material da superfície do isolador e suas condições.

A velocidade do vento, por exemplo, tem grande influência sobre a taxa de acúmulo de poluição. Em regiões nas quais o fluxo do vento segue em todas as direções com velocidade constante, observa-se então um acúmulo linear de poluentes. Todavia, em casos de ventos fortes vindo de apenas uma direção, as influências da velocidade e da direção do vento possuem um importante papel. Este tipo de situação pode ser verificado em regiões litorâneas com os ventos vindo do oceano.

Neste tipo de região é comum a ocorrência de corrosão e degradação dos materiais dos isoladores, pois tais regiões possuem um tempo de superfície úmida elevado, alta corrosividade ambiental, altas taxas de salinidade e material particulado de dureza elevada. Além disso, devidos aos ventos predominantes em direção ao continente, pode-se haver corrosão atmosférica pelos íons cloretos e sulfatos e,

também, erosão por abrasão das superfícies dos materiais. Ainda, a alta taxa de radiação solar amplia a possibilidade de degradação dos materiais, principalmente, os poliméricos.

Considerando a influência que o depósito de poluentes sobre a superfície dos isoladores pode causar em seu funcionamento, diversos métodos são definidos para avaliação da severidade da poluição local. Tais métodos podem ser utilizados para auxiliar a determinação do tipo ideal de isolador para uma aplicação em particular. A próxima seção apresentará tais métodos.

2.5. MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO DE ISOLADORES

As ações de manutenção em linhas de transmissão usualmente visam aumentar a capacidade de isolação das cadeias ou remover a camada de poluentes presentes nos isoladores [41, 42], isto é:

- **Para Aumentar a Capacidade de Isolação** – Pode-se aumentar o número de isoladores, ou aumentar a distância de escoamento dos isoladores. Além disso, pode-se substituir a cadeia por isoladores poliméricos que possuam propriedades hidrofóbicas. Pode-se também utilizar revestimentos hidrofóbicos sobre os isoladores, como compostos de silicões, mas requer manutenção constante.
- **Para Remover a Camada de Poluentes** – Deve-se ser feita a lavagem dos isoladores. Esta lavagem pode ser realizada com a linha de transmissão energizada ou não, e sua periodicidade depende da severidade do acúmulo de poluição sobre os isoladores e do clima do local, pois em períodos chuvosos, os isoladores são naturalmente lavados.

Todavia, tais processos são dispendiosos e não automatizados. Para auxiliar neste processo de manutenção, muitos métodos de avaliação dos níveis de severidade da poluição em isoladores de LT foram desenvolvidos. Esses métodos podem ser utilizados para caracterizar a severidade da poluição local. A norma IEC/TS 60815-1 define a forma de utilização de tais métodos para a caracterização qualitativa da poluição em cinco classes, as quais vão desde muito leve até poluição muito pesada.

Para as empresas é essencial possuir métodos para medir o nível de poluição e sua severidade em relação ao funcionamento dos equipamentos de forma a permitir

ações de manutenção preventiva. O funcionamento básico dos métodos tradicionais de monitoramento do nível de poluição em isoladores é apresentado a seguir:

- **Densidade Superficial de Depósito de Sal Equivalente (DDSE)** – É uma das maneiras mais populares para avaliar o nível de poluição acumulada sobre a cadeia de isoladores. Para a medição da DDSE, os isoladores são removidos das LT e levados até um laboratório, onde a camada de poluentes é completamente removida com o auxílio de pincéis ou escovas que lavam o isolador com uma quantidade conhecida de água destilada. A condutividade da solução resultante é medida e a partir dela se pode calcular a concentração de sal que seria necessária para gerar uma solução com a mesma condutividade e nas mesmas condições. Como se conhece o volume de água utilizado, é então possível se obter a massa de sal na solução. Este parâmetro de densidade permite estimar a severidade da poluição na cadeia de isoladores. É uma técnica relativamente cara, por isso, não se deve ser realizada sem propósito. Para evitar isso, pode-se também utilizar uma cadeia testemunha, que pode fornecer a quantidade aproximada de poluentes depositados na cadeia em uso. Porém, não é muito útil quando desenergizada, pois o campo elétrico é responsável por atrair parte da poluição e, sem energia, a aderência de poluentes seria prejudicada. Em adição, a sua utilização de forma energizada se torna muito custosa.
- **Densidade Superficial de Depósito Não Solúvel (DDNS)** – Somente a medição da DDSE para medir a severidade do acúmulo de poluição não é suficiente para indicar a iminência de *flashover*, pois existem poluentes que não são solúveis em água, mas que também afetam os isoladores. Para esses poluentes usa-se como parâmetro a densidade de depósito de substâncias não solúveis, de forma a complementar a medida da DDSE. Para medir a DDNS, depois de realizada a medição da condutividade da solução para a DDSE, deve-se realizar a filtragem da solução. Desta forma, a massa dos poluentes não solúveis pode ser então medida.
- **Medição da Resistência de Superfície** – Quanto maior for a quantidade de poluentes sobre o isolador, menor será a resistência elétrica de sua

superfície. Para realizar a medição basta aplicar uma tensão baixa sobre o isolador ou sobre parte de sua superfície e medir a corrente elétrica que flui através dela. Todavia, a corrente elétrica também é dependente da temperatura e da umidade. Desta forma, diversos métodos para medição foram propostos na literatura. Busca-se determinar um valor limite, tal que, qualquer resultado abaixo dele indique a alta probabilidade de ruptura da linha de transmissão. Segundo alguns estudos, este valor está em torno de 100 k Ω . Este método possui as mesmas desvantagens do método DDSE, pois os isoladores precisam ser retirados da LT e transportados para um laboratório. Além disso, devido à dependência da resistência com a umidade, é necessário utilizar técnicas artificiais para gerar um ambiente úmido que tornam o procedimento mais custoso.

- **Detecção de Emissões Luminosas e Sonoras** – As ocorrências das descargas elétricas causam o aquecimento da superfície, a ionização, a quebra da rigidez dielétrica, e por esses motivos, provocam a emissão de som e de radiação eletromagnética numa larga faixa de espectros. O aquecimento da camada de poluentes causa emissões na faixa do infravermelho e, por este motivo, utilizando uma câmera térmica, é então possível encontrar pontos de maior circulação de corrente, assim como pontos onde serão formadas as bandas secas. Quando ocorre a quebra da rigidez dielétrica dos materiais, o aquecimento é ainda mais elevado e gera radiação visível que pode ser vista diretamente por inspetores da linha. Para detectar tais emissões, inspetores monitoram as linhas durante a madrugada (devido à maior umidade do ar e da falta de outras fontes de luz) para buscar a ocorrência de DP. Todavia, este método possui a desvantagem de necessitar de uma equipe para se deslocar até o local, e caso a umidade esteja baixa não é possível realizar a inspeção, o que impede o acompanhamento contínuo do nível de deposição de contaminantes nos isoladores. As ocorrências de descargas parciais também geram ruídos sonoros; desta forma, outra alternativa é a utilização de técnicas de processamento de sinais para identificar os padrões sonoros dessas descargas.

- **Medição da Corrente de Fuga** – A corrente de fuga é um bom indicador do nível de poluição da superfície do isolador. Portanto, pode-se então utilizar sensores de corrente, a fim de se obter (de maneira remota) os dados sobre as condições do isolador e realizar um diagnóstico sobre o seu funcionamento, assim como a necessidade de manutenção preventiva. Todavia, é necessário considerar o nível de umidade para realizar o diagnóstico.

Capítulo 3

Aspectos de Hardware do Protótipo

3.1. INTRODUÇÃO

O sistema proposto para o protótipo de aparato sensorial para monitoramento de correntes de fuga, decorrentes da deposição do nível de contaminantes em isoladores elétricos, é fundamentado em filosofias do *System on a Chip*, incluindo comunicação de longo alcance como a tecnologia LoRa (*Long Range*).

Esta filosofia representa redução de custos, desenvolvimento simplificado e possibilidade de utilização de vários níveis de segurança.

As informações sobre o custo estimado de cada instalação para uma subestação, assim como um detalhamento dos elementos que compõe cada monitor, são apresentadas nas Tabela 3.1 a Tabela 3.3.

Tabela 3.1 – Detalhamento orçamentário do sensor de monitoramento de condição do sistema de isolamento.

Dispositivo	Elemento	Preço por unidade
Sensor de monitoramento de condição do sistema de isolamento	Amplificador diferencial (1 un)	R\$ 50,00;
	Transdutor de valor eficaz (conversor RMS) (1 un)	R\$ 50,00;
	Microcontrolador ESP32 com rádio LoRa (1 un)	R\$ 170,00
	Microfone (1 un)	R\$ 37,00
	Fonte de 5 Volts (1 un)	R\$ 74,00
	Caixa de acondicionamento (1 un)	R\$ 18,00
Preço total		R\$ 399,00

Tabela 3.2 – Detalhamento orçamentário do sensor de monitoramento de variáveis ambientais.

Dispositivo	Elemento	Preço por unidade
Sensor de monitoramento de variáveis ambientais	Sensor BME (1 un)	R\$ 150,00;
	Sensor DSM501 (1 un)	R\$ 70,00;
	Microcontrolador ESP32 com rádio LoRa (1 un)	R\$ 170,00
	Fonte de 5 Volts (1 un)	R\$ 74,00
	Caixa de acondicionamento (1 un)	R\$ 18,00
Preço total		R\$ 482,00

Tabela 3.3 – Detalhamento orçamentário da unidade concentradora.

Dispositivo	Elemento	Preço por unidade
Unidade concentradora de dados	Microcontrolador ESP32 com rádio LoRa (1 un)	R\$ 170,00
	Microcomputador (1 un)	R\$ 4.229,99
Preço total		R\$ 4.399,99

Observa-se que o monitor de grandezas elétricas custa aproximadamente R\$ 399,00, enquanto que o monitor de variáveis ambientais custa em torno de R\$ 482,00. Por fim, observa-se que a unidade concentradora custa R\$ 4.399,99. Desta forma, o custo aproximado para instalar o sistema completo de monitoramento em cada subestação da ARGO será de R\$ 5.280,99. É importante pontuar, que o custo do aparato sensorial está associado a fase de protótipo, caso haja interesse em produzi-lo em maior escala, este custo provavelmente teria uma significativa redução.

Ressalta-se ainda que para o monitor de variáveis ambientais, basta a instalação de uma unidade por subestação, enquanto que, para o monitor de grandezas elétricas, deve-se instalar uma unidade por equipamento que se deseja observar.

Ao buscar no mercado um aparato sensorial similar que poderia atender as necessidades para monitoramento de corrente de fuga observa-se que não existe uma solução completa como o aparato desenvolvido. Seria necessária a combinação de diversos sensores de forma a obter todas as informações necessárias. O custo para a

aquisição e combinação ultrapassaria facilmente R\$ 100.000,00, conforme breve cotação realizada para alguns tipos de sensores.

3.2. ELEMENTOS DO APARATO DESENVOLVIDO

Na Figura 3.1 tem-se a visualização do Kit Lora-E5, o qual utiliza o microcontrolador STM32WLE5JC, sendo seu núcleo de processamento Arm® Cortex®-M4 256-Kbyte Flash de memória e 64-Kbyte SRAM, e frequência de operação do LoRa para 868/915/923/920/865 MHz.

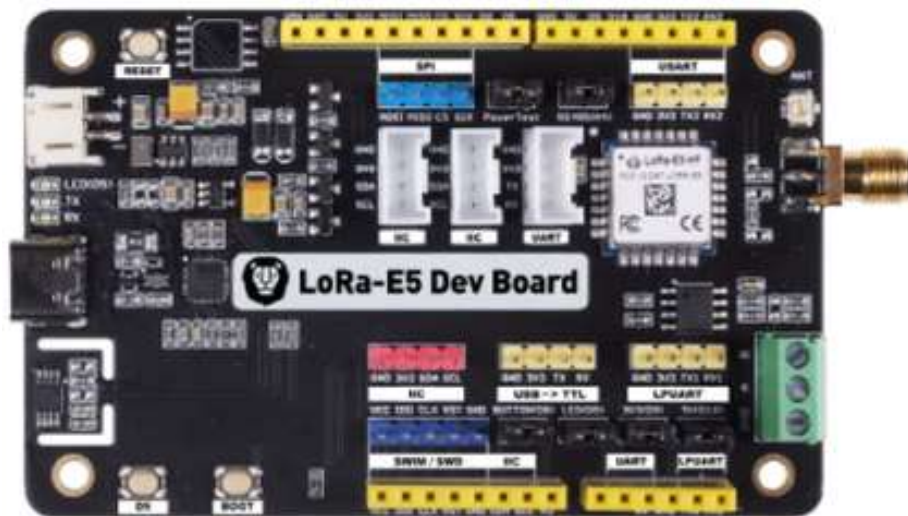


Figura 3.1 – Kit do sistema LoRa-E5.

Uma alternativa é a utilização da rede Sigfox, a qual utiliza a técnica *Ultra Narrow Band*, ou seja, uso ótimo da potência disponível. A faixa de frequência depende da região (entre 902 e 928 MHz) e é também resistente a interferências. Há ainda o recurso do acesso aleatório, sendo que uma mensagem é enviada em diferentes frequências e em diferentes momentos.

Assim, uma mensagem é recebida por múltiplas estações base Sigfox, propiciando-se a diversidade espacial. Além disso, possui alta capacidade de rede, permitindo-se também que bilhões de objetos possam ser conectados. A transferência de informações é otimizada para pequenos pacotes que podem conter até 12 bytes. Como exemplo, uma informação de temperatura que utiliza 10 bits poderia estar dentro do domínio de -40 a 105 °C, com uma precisão de 0,1°C.

Trata-se, portanto, de uma arquitetura horizontal e estreita de duas camadas, tal como representado pela Figura 3.2. É possível traçar comparativos entre LoRaWAN e Sigfox, tal como mostrado na Tabela 3.4.

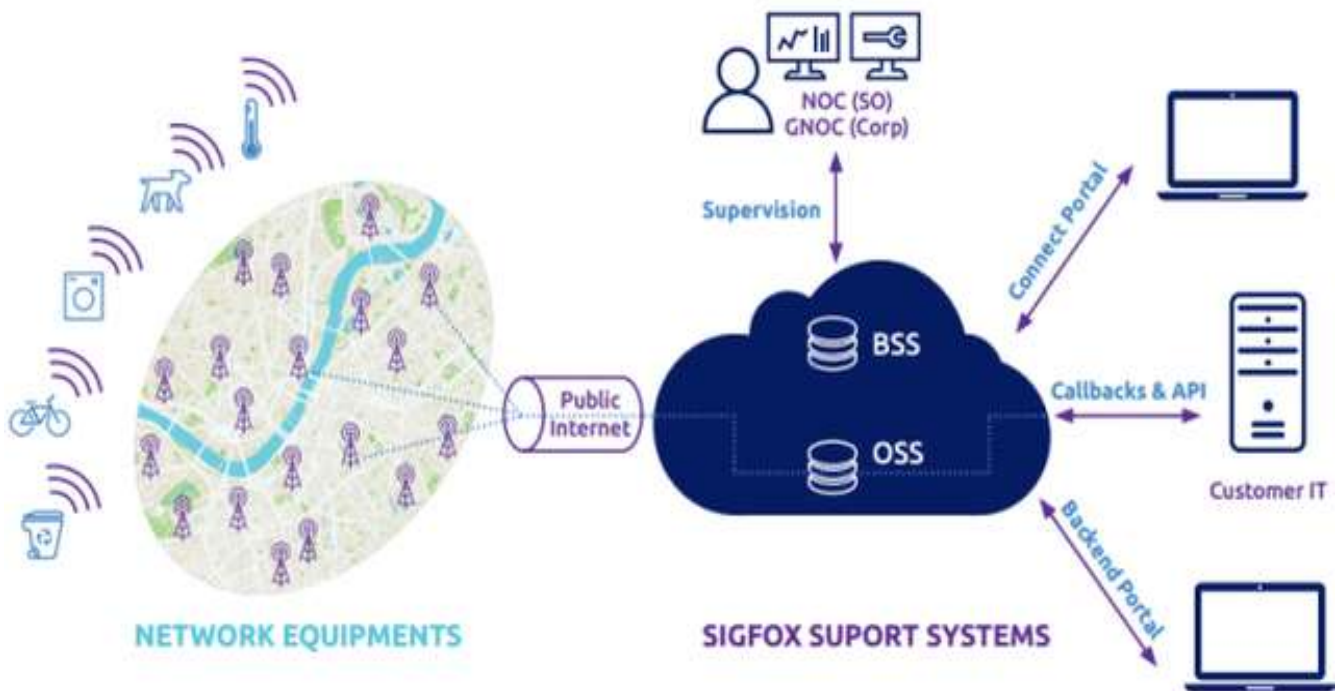


Figura 3.2 – Arquitetura Sigfox.

Tabela 3.4 – Comparativo entre LoRaWAN e Sigfox.

Aspecto	LoRaWAN	Sigfox
Tecnologia	Espectro espalhado	Ultra-narrowband
Equipamentos permitidos	Sem restrições	Apenas certificados pelo Sigfox
Tamanho das informações	Sem restrições	Máximo de 12 bytes
Limite de mensagens	Sem restrições	Máximo de 140 por dia
Operador de rede	Redes autônomas	Com licenciamento em cada país

3.3. ASPECTOS DE COMUNICAÇÃO DE DADOS

Conforme comentado anteriormente, o sistema proposto é fundamentado em filosofias do *System on a Chip*, incluindo comunicação de longo alcance como a tecnologia LoRa.

A placa escolhida para desenvolvimento deste sensor, a STM32WLE5JC, possui implementadas “features” para seguranças de ataques externos e internos, tanto em hardware como em software. Como exemplo, têm-se:

- Proteção de escrita e leitura na memória;
- Possui o MPU (*Memory Protection Unit*);
- Isolação segura entre os núcleos M4 e M0;
- Instalação e atualização segura do firmware;
- LoRaWAN – dois níveis de criptografia dos dados;
- O LoRa é um protocolo de comunicação composto por duas partes:
 - LoRa – camada física.
 - LoRaWAN – LoRa Wide Area Network – Camada superficial do LoRa.
 - Define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema;
 - Garante a segurança dos dados.

Desta maneira, o aparato sensorial tem uma filosofia de funcionamento em termos de comunicação como mostrado na Figura 3.3.

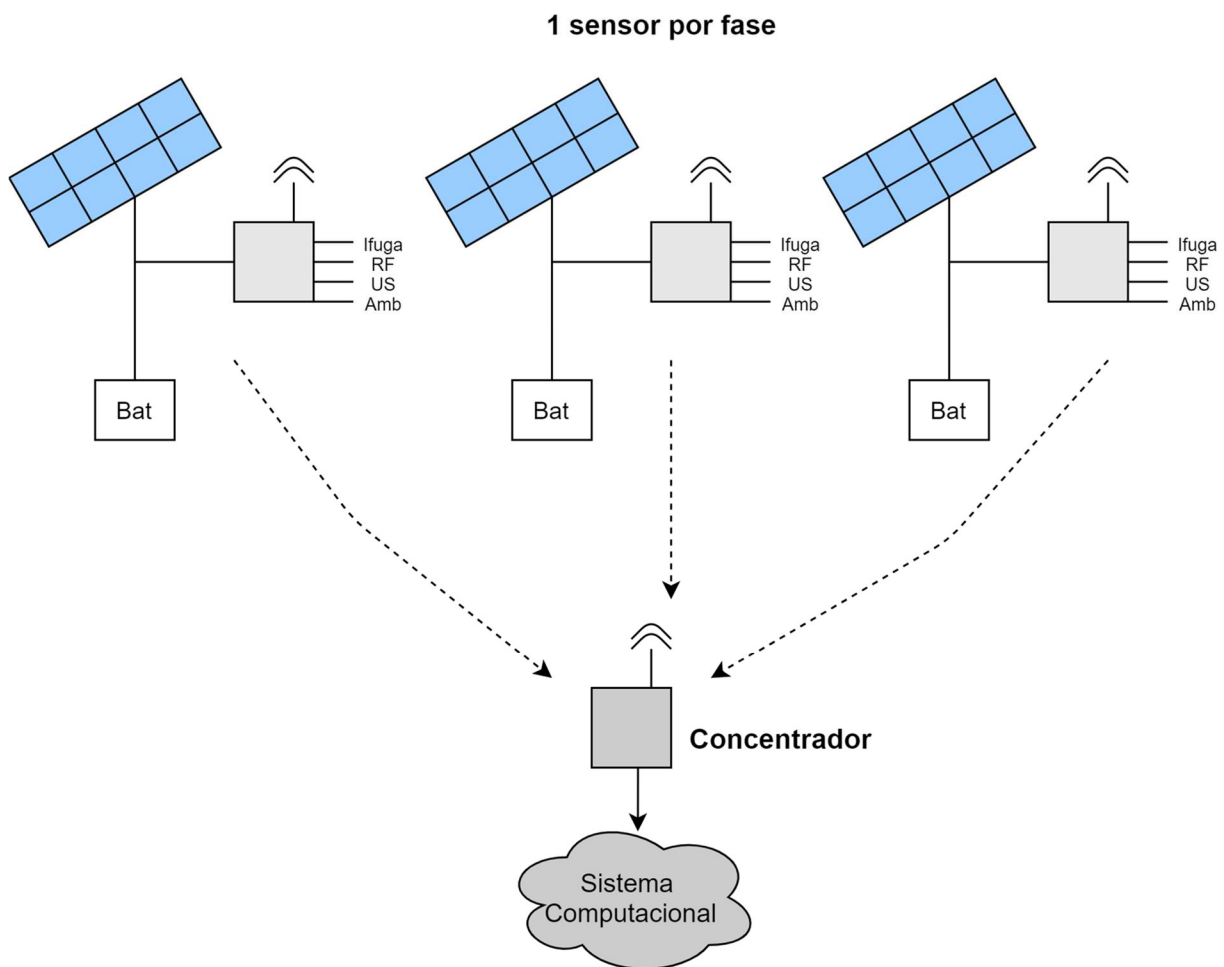


Figura 3.3 – Filosofia de comunicação do aparato sensorial.

Um fator crítico no projeto é o alcance dos sistemas de comunicação, sendo que para tais situações a filosofia de comunicação LoRa é a mais adequada. No entanto, para garantir confiabilidade em campo, o hardware escolhido para testes fora submetido a diversos ensaios visando caracterizar sua atuação com e sem obstáculos.

Para tanto, frente a este intuito, foram então realizados testes dos parâmetros de comunicação envolvendo a tecnologia LoRa, sendo eles os seguintes:

- **Frequência** – Frequência utilizada para transmitir os dados.
- **Potência de Transmissão** – Depende das leis do país.
- **Largura de Banda** – Define a quantidade de dados que se pode enviar em uma transmissão: quanto maior a largura de banda, menor a distância de transmissão e maior o gasto de potência.

- **Fator de Espalhamento** – Determina como os dados estão espalhados pela largura de banda: quanto maior o espalhamento, maior a distância de transmissão e maior o gasto de potência.
- **Coding Rate** – define quantos bits são adicionados ao sinal para a correção de erros: quanto maior o número de bits de correção, maior a distância de transmissão e maior o gasto de potência.

Nos testes realizados foram empregados os seguintes parâmetros, conforme apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros considerados nos testes de transmissão (1).

Parâmetro	Valor
Potência de saída	14 dBm
Largura de banda	125 kHz
Fator de espalhamento	7
<i>Coding rate</i>	4/5

Neste primeiro teste, a distância de transmissão foi de 387 metros com os parâmetros da Tabela 3.5.

Este teste foi feito com duas placas de comunicação à distância, funcionando como *Master/Slave*, sendo que na Figura 3.4 é possível visualizar (via imagem de satélite) os obstáculos entre as placas.

Já na Figura 3.5 tem-se o teste 2, onde foram alterados os parâmetros de comunicação, conforme mostrado na Tabela 3.6.



Figura 3.4 – Teste 1 (Distância de 387 metros).



Figura 3.5 – Teste 2 (Distância de 465 metros).

Tabela 3.6 – Parâmetros considerados nos testes de transmissão (2).

Parâmetro	Valor
Potência de saída	22 dBm
Largura de banda	125 kHz
Fator de espalhamento	7
<i>Coding rate</i>	4/5

3.4. BOBINA DE ROGOWSKI E ELEMENTOS SENORIAIS

Para os propósitos do projeto, a Figura 3.6 apresenta um diagrama compacto que permite visualizar as principais motivações em se utilizar o sistema de aquisição proposto, o qual pode ser integrado aos sensores de corrente de fuga (entrada analógica), sensores de poeira (sinal PWM – *Pulse Width Modulation*), sensores de RF (Radiofrequência – entrada analógica), sensores de variáveis ambientais (comunicação I2C – *Inter Integrated Circuit*) e sensores de emissão acústica (entrada analógica).

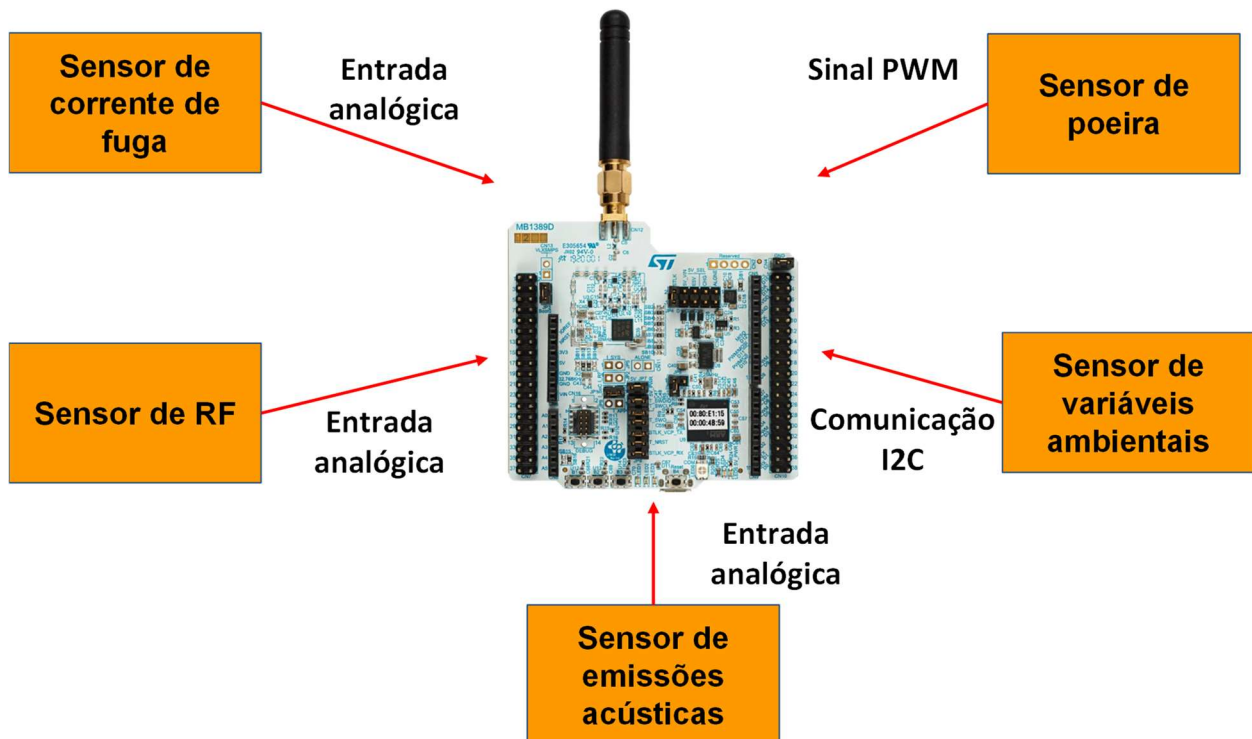


Figura 3.6 – Diagrama esquemático sobre as principais características da placa de aquisição.

Assim, cada elemento sensorial pode ser especificado separadamente a fim de compor o sistema de monitoramento das variáveis elétricas e ambientais, sendo que o sensor de corrente de fuga é um dos que necessita de especial atenção.

Para evitar interrupções nos circuitos para monitoramento da corrente de fuga, optou-se pela confecção de uma bobina de Rogowski, tal como exemplificado pela Figura 3.7.

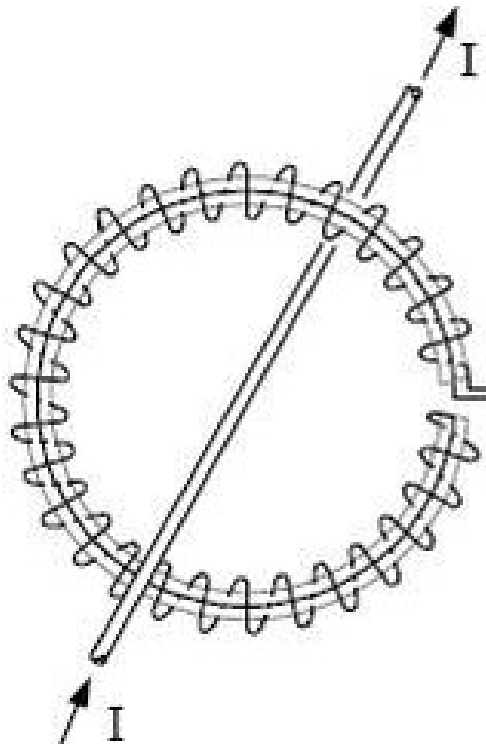


Figura 3.7 – Diagrama esquemático referente à bobina de Rogowski.

Este tipo de arranjo permite o monitoramento de correntes sem a necessidade de interrupção do circuito, tendo em vista que a bobina é aberta com o intuito de envolver o condutor a ser monitorado.

O funcionamento da bobina se baseia nas leis de Ampère e de Faraday-Neumann-Lenz, ao medir o valor líquido da corrente elétrica que percorre um condutor e fornecer um valor de tensão em sua saída equivalente ao valor de corrente aferido.

A bobina desenvolvida para o protótipo do sensor, a qual foi também utilizada nos experimentos em laboratório, é apresentada na Figura 3.8 a seguir.



Figura 3.8 – Bobina de Rogowski para monitoramento da corrente de fuga.

O enrolamento fora feito de forma a sensibilizar as entradas analógicas do STM32WLE5JC, sendo em seguida recoberto com termo retrátil para proteção mecânica. Maiores detalhes da instalação desta bobina poderão ser conferidos no Capítulo 4.

Buscando sempre melhorias no sistema de monitoramento, a arquitetura dos elementos sensores foi modularizada. Isso significa que os módulos são independentes, sendo que o processamento especializado de dados ocorre localmente, como pode ser observado na Figura 3.9.

Todos os elementos sensores LoRa possuem uma plataforma base, tal como representado pela Figura 3.10.

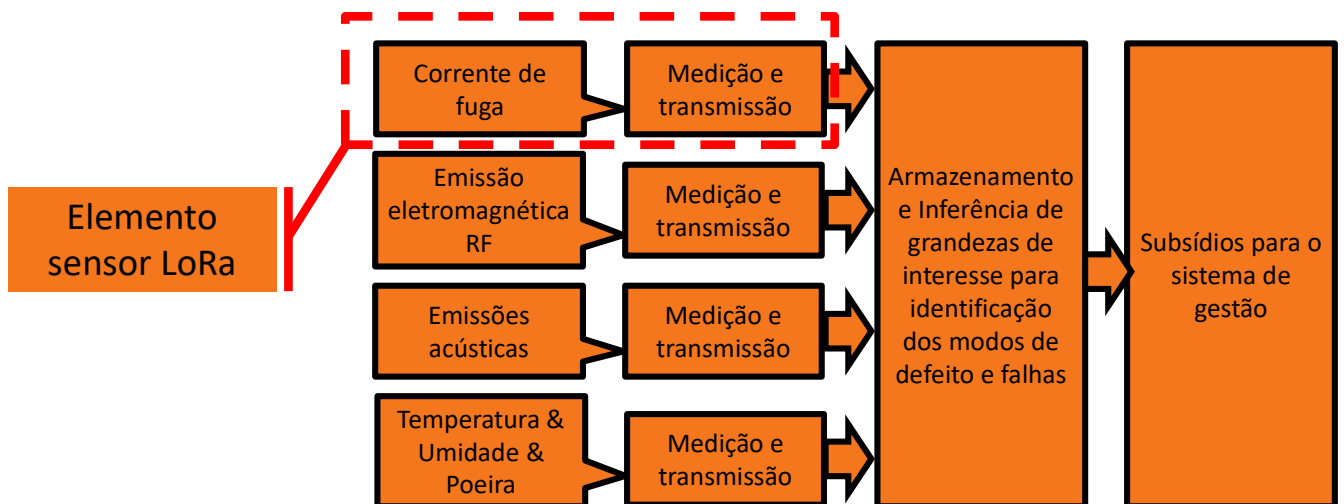


Figura 3.9 – Modularização dos elementos sensores.

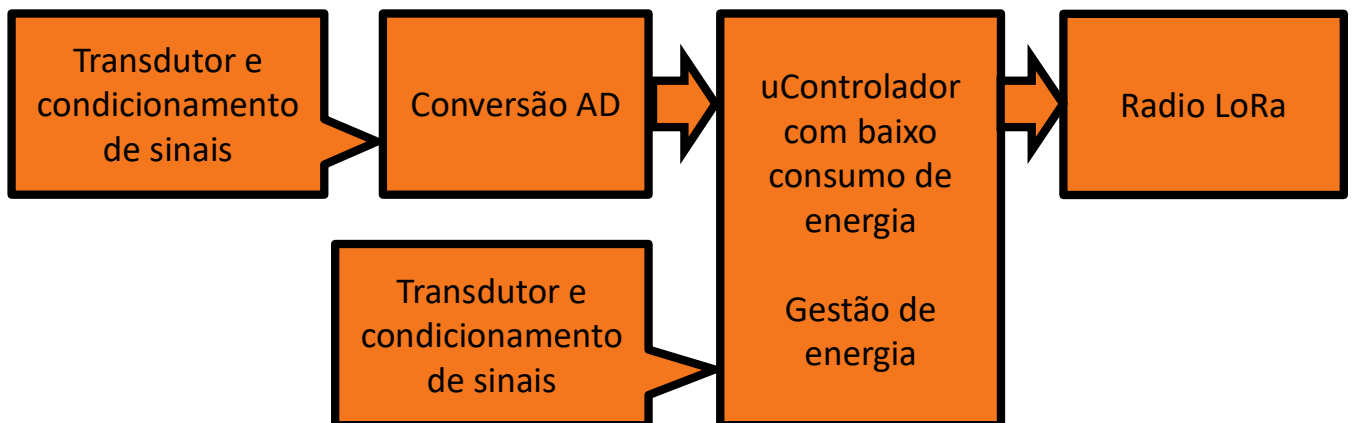
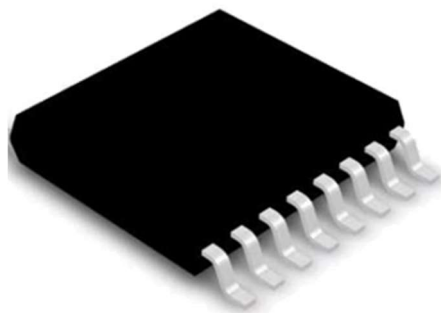


Figura 3.10 – Plataforma base dos elementos sensores LoRa.

A “Conversão AD” é feita pelo TSSOP-16 (Figura 3.11) e o microcontrolador é o próprio STM32 (Figura 3.12). O Rádio LoRa é formado pelo módulo Ra-02, conforme ilustrado na Figura 3.13.



TSSOP-16

Figura 3.11 – Conversor TSSOP-16.

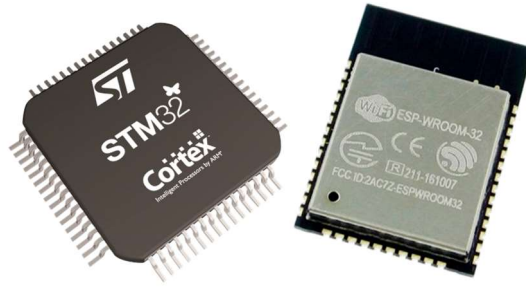


Figura 3.12 – Ilustração do microcontrolador STM32.

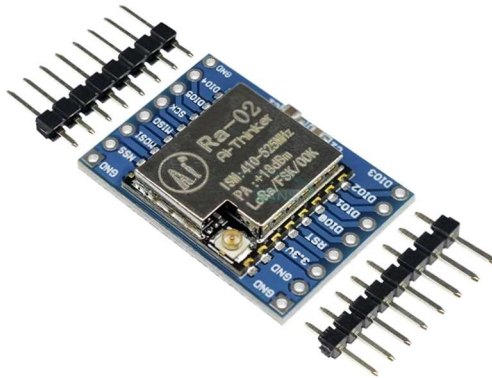


Figura 3.13 – Ilustração do rádio LoRa formado pelo módulo Ra-02.

O sistema computacional foi desenvolvido de forma a ser capaz de automaticamente identificar novos elementos sensores no campo de alcance, baseando-se em sistema operativo em tempo real (RTOS – *Real Time Operating System*), conforme a Figura 3.14.

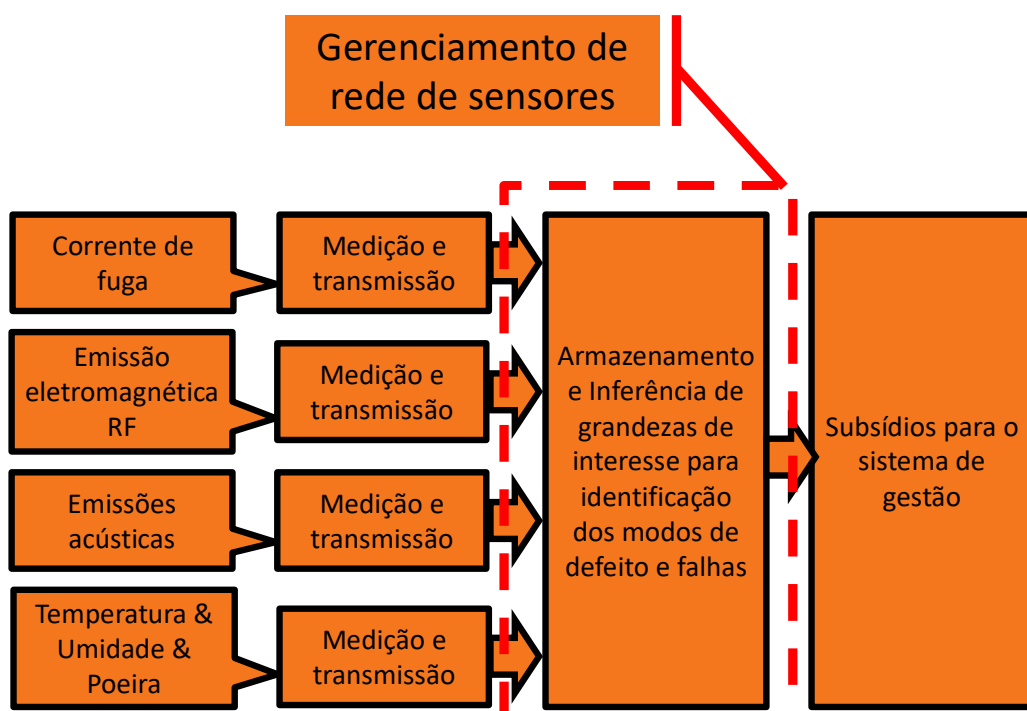


Figura 3.14 – Gestão de sensores modulares.

3.5. ASPECTOS DO SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Quando há necessidade da gestão de recursos e processos, a escolha de implantação de um Sistema Operacional (SO) sempre é a mais adequada, tendo-se em vista que se consegue um maior controle sobre todas as etapas advindas da gestão de recursos computacionais.

O sistema proposto para o sensor é fundamentado em filosofias do tipo *System on a Chip*, incluindo comunicação de longo alcance como a tecnologia LoRa. Esta filosofia representa redução de custos, desenvolvimento simplificado e possibilidade de utilização de vários níveis de segurança.

Para os propósitos do projeto, a Figura 3.15 apresenta um diagrama compacto que permite visualizar as principais motivações em se utilizar o sistema de aquisição proposto, o qual pode ser integrado aos sensores de corrente de fuga (entrada analógica), sensores de poeira (sinal PWM), sensores de RF (entrada analógica), sensores de variáveis ambientais (comunicação I2C) e sensores de emissão acústica (entrada analógica).

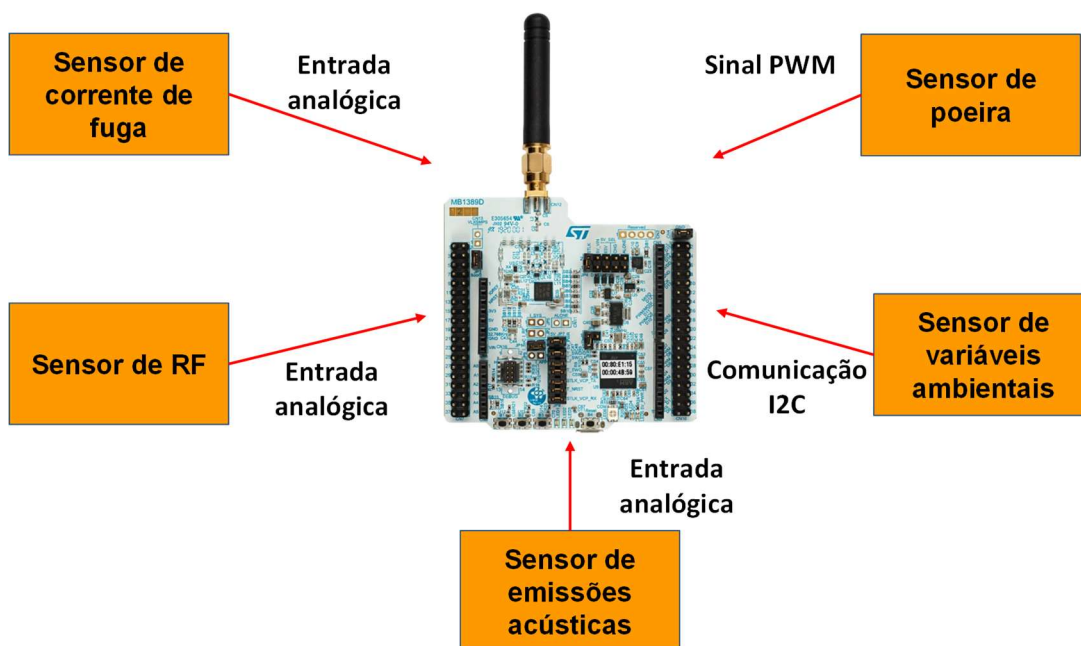


Figura 3.15 – Diagrama esquemático sobre as principais características da placa de aquisição.

O sistema operacional de propósito geral usado neste tipo de sensor é capaz de rodar múltiplas aplicações (simultaneamente), gerenciar arquivos e recursos, e utilizar drivers. O foco é então a interação com o usuário, sendo que a latência pode ser aceitável, pois tarefas com prazos exatos e determinísticas são difíceis de se obter em GPOS (*General Purpose Operating System*).

Já os sistemas RTOS, usualmente feitos para microcontroladores, garantem que os prazos das tarefas sejam atendidos, pois possuem a habilidade de executar múltiplas tarefas simultaneamente. O sistema alterna entre as tarefas e gerencia a sincronização e a prioridade entre elas. Entretanto, uma das arquiteturas mais comuns é aquela denominada de Super Loop, conforme ilustrada na Figura 3.16.

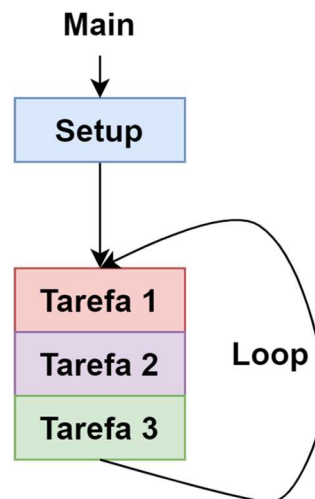


Figura 3.16 – Diagrama da arquitetura Super Loop.

A implementação da arquitetura Super Loop é mais simples e é também mais fácil de debugar. O problema se encontra quando se executa múltiplas tarefas, pois atrasos podem ocorrer, os quais devem causar também perdas de informação.

Já nos RTOS, esses problemas deixam de ocorrer, pois tudo é executado de maneira concorrente, conforme ilustrado na Figura 3.17, sendo que não há o risco de perder a leitura de um sensor, por exemplo.

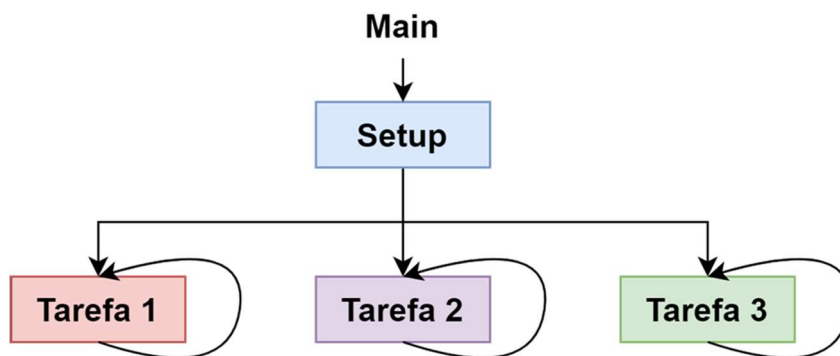


Figura 3.17 – Diagrama da arquitetura RTOS.

De fato, em microcontroladores com mais de um *core* (núcleo), duas tarefas podem ser fisicamente executadas ao mesmo tempo. A cada *tick* (ciclo) de tempo, o gerenciador escolhe uma tarefa para ser executada, dependendo-se da sua prioridade e do seu modo de execução, conforme ilustrado na Figura 3.18.

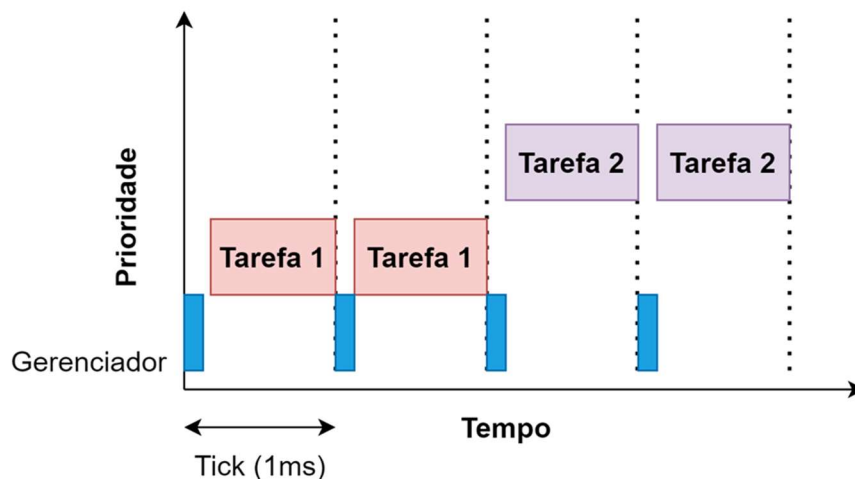


Figura 3.18 – Concorrência de tarefas na arquitetura RTOS.

Assim, nos RTOS a execução do programa não fica travada devido a eventuais atrasos como seria no Super Loop. Para o sistema de monitoramento proposto, a Tabela 3.7 ilustra as tarefas a serem desempenhadas.

Tabela 3.7 – Conjunto de tarefas do sistema de monitoramento.

Tarefa	Sensor	Atividades
1	Corrente de fuga	Ler resultado da conversão AD
2	Emissão acústica	Ler resultado da conversão AD
3	RF	Ler resultado da conversão AD
4	Poeira	Ler sinal PWM, calcular o duty cycle
5	Variáveis ambientais	Receber dados via comunicação I2C

Portanto, para o correto monitoramento das variáveis é então preciso que no mínimo dois módulos, um de transmissão e um de recepção, sejam desenvolvidos. Para tanto, a aplicação implementa uma placa que opera como concentrador, que administra uma rede que pode ter até 14 sensores e que recebe os dados de cada um desses sensores. Deve-se configurar o concentrador com a frequência de comunicação desejada. No caso deste trabalho, utiliza-se a frequência da região da China (aproximadamente 480 MHz). O concentrador envia *beacons* (notificações) para os sensores, ao passo que os sensores enviam dados de medições (corrente elétrica, temperatura, pressão, etc.) para o concentrador. Este procedimento pode ser conferido na Figura 3.19.

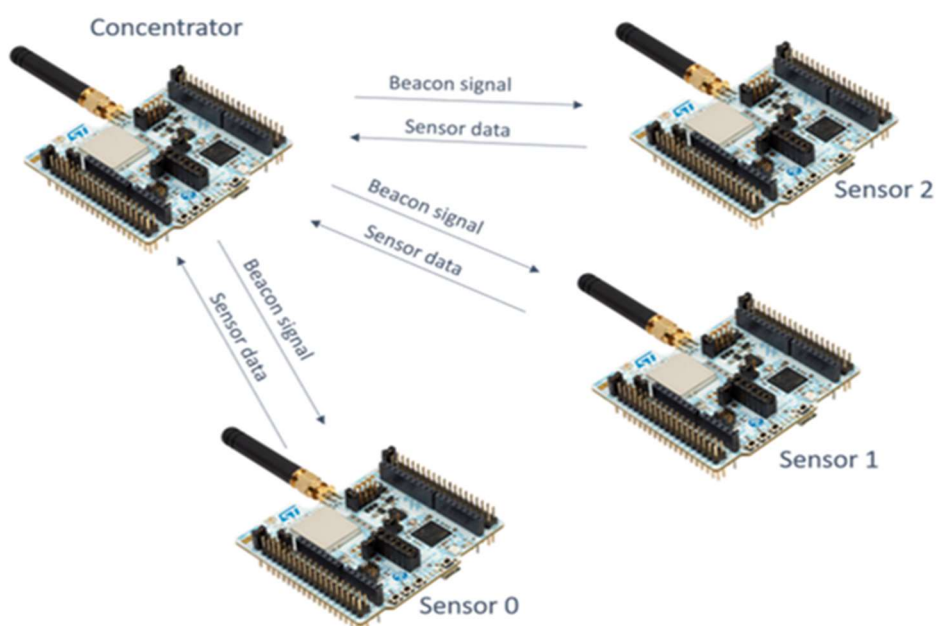


Figura 3.19 – Representação dos *beacons* na rede de sensores.

Cada ciclo de comunicação entre o sensor e o concentrador dura 16 intervalos de tempo, cada um de um segundo. Neste período, os seguintes processos são realizados conforme ilustrado na Figura 3.20.

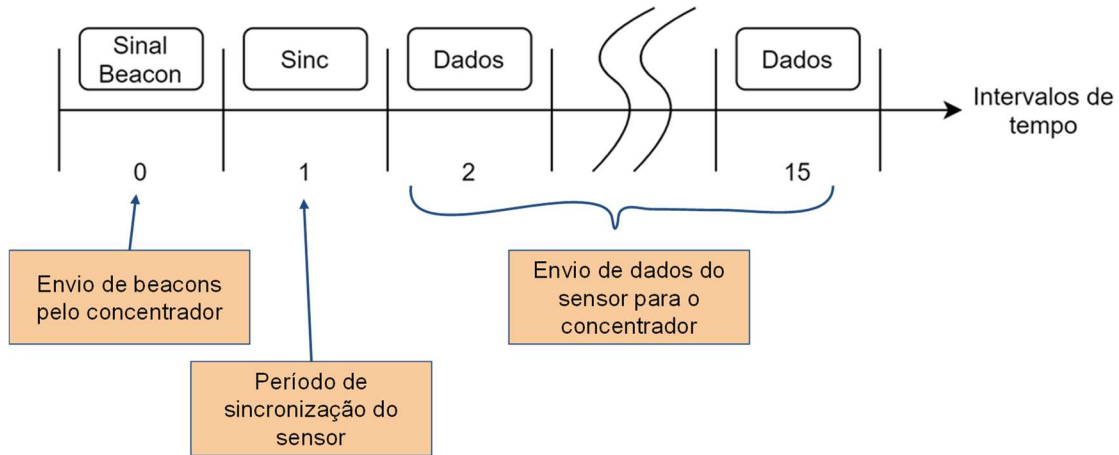


Figura 3.20 – Linha do tempo da transmissão de *beacons*.

O monitoramento destas informações pode ser feito pela interface CubeMonitor, a qual é fornecida pela própria STM fabricante do kit, conforme ilustrado na Figura 3.21.

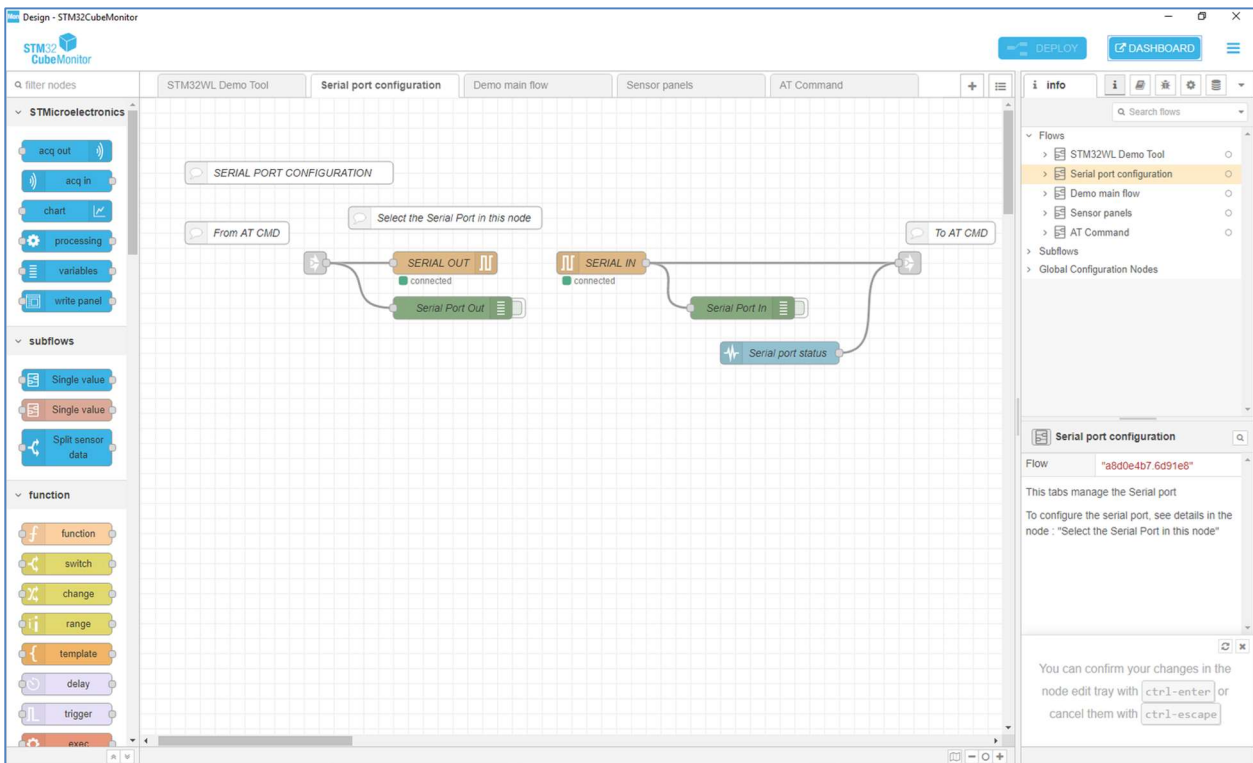


Figura 3.21 – Acompanhamento com CubeMonitor.

Uma Dashboard pode ser então criada para o acompanhamento dos sensores, tal como representado pelas Figuras 3.22 e 3.24.

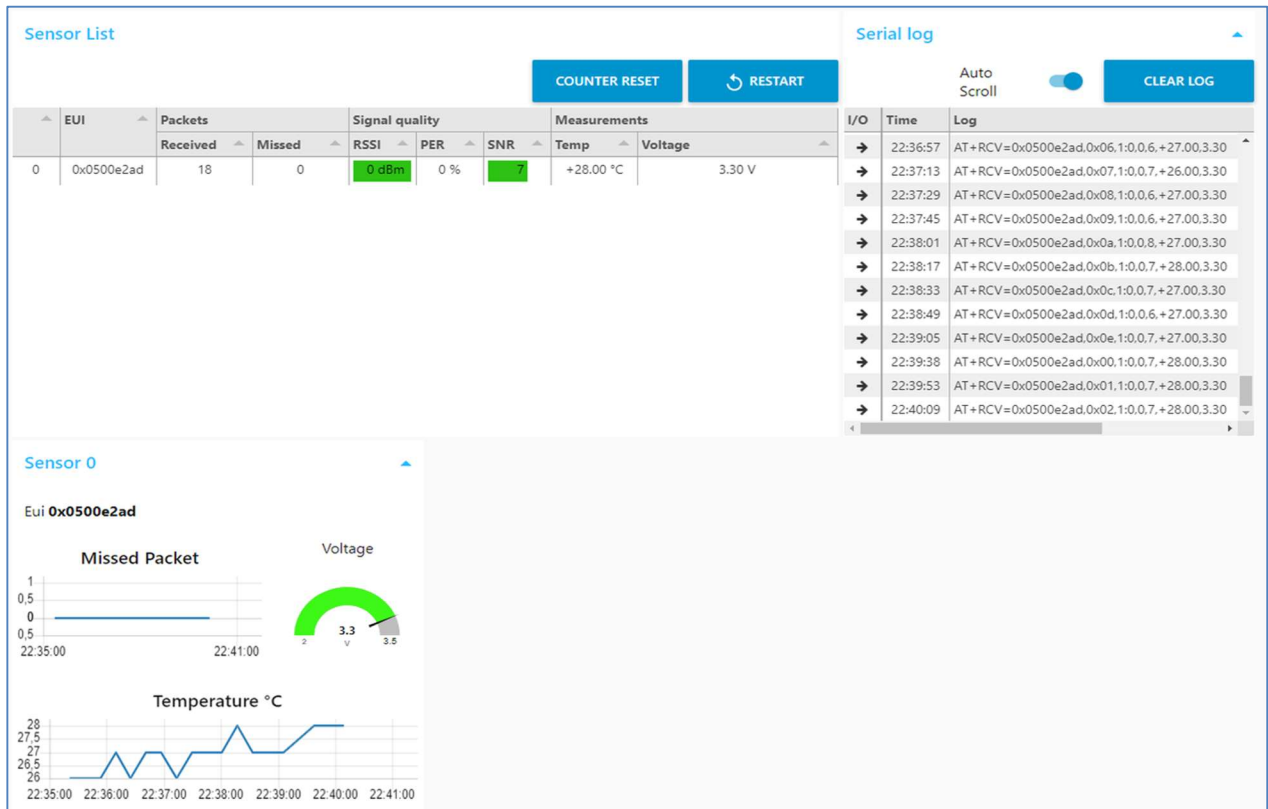


Figura 3.22 – Dashboard com a relação dos sensores conectados ao concentrador.

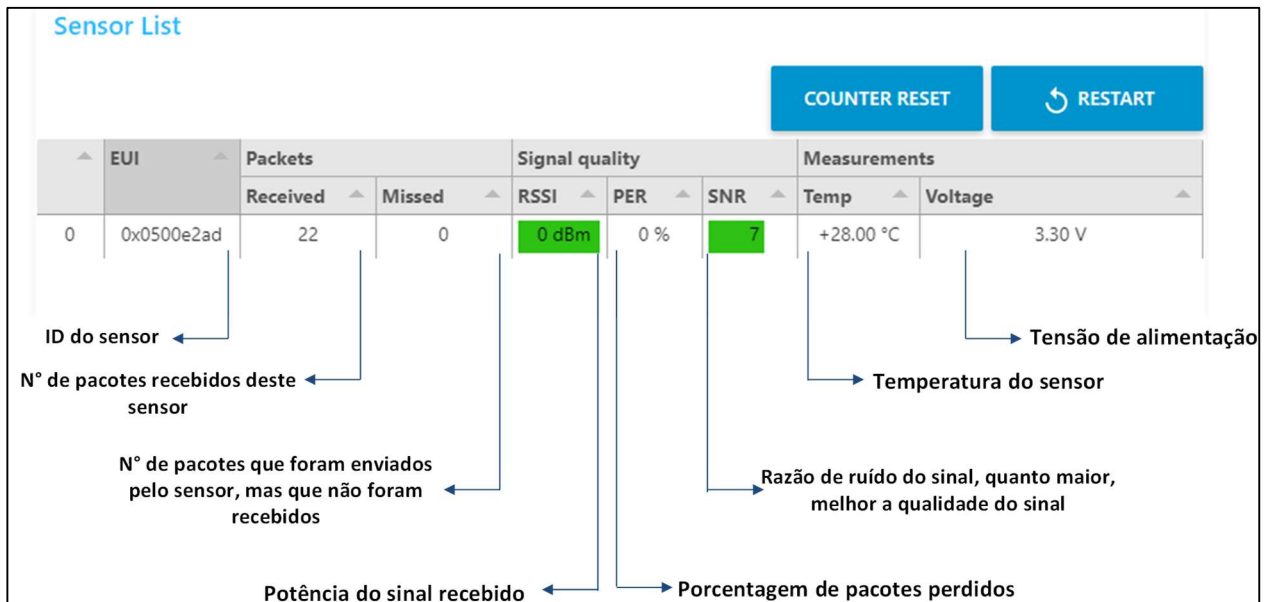
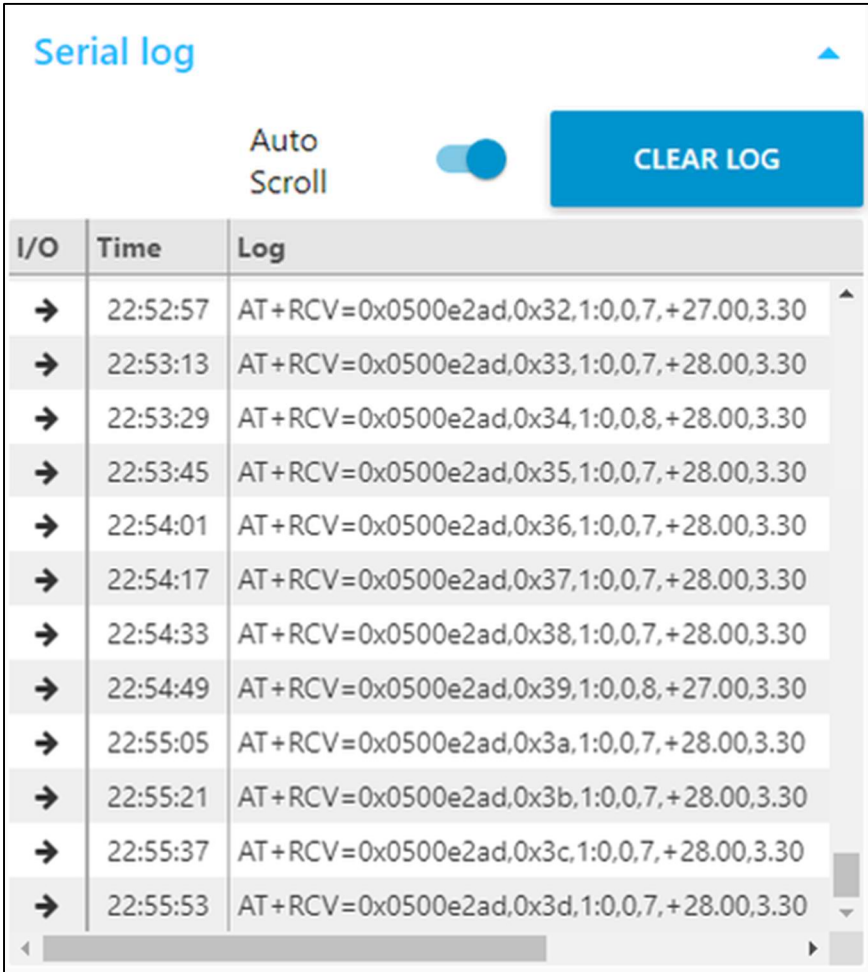


Figura 3.23 – Significado dos rótulos do Dashboard com a relação dos sensores conectados ao concentrador.



Serial log

Auto Scroll

CLEAR LOG

I/O	Time	Log
→	22:52:57	AT+RCV=0x0500e2ad,0x32,1:0,0,7,+27.00,3.30
→	22:53:13	AT+RCV=0x0500e2ad,0x33,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:53:29	AT+RCV=0x0500e2ad,0x34,1:0,0,8,+28.00,3.30
→	22:53:45	AT+RCV=0x0500e2ad,0x35,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:54:01	AT+RCV=0x0500e2ad,0x36,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:54:17	AT+RCV=0x0500e2ad,0x37,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:54:33	AT+RCV=0x0500e2ad,0x38,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:54:49	AT+RCV=0x0500e2ad,0x39,1:0,0,8,+27.00,3.30
→	22:55:05	AT+RCV=0x0500e2ad,0x3a,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:55:21	AT+RCV=0x0500e2ad,0x3b,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:55:37	AT+RCV=0x0500e2ad,0x3c,1:0,0,7,+28.00,3.30
→	22:55:53	AT+RCV=0x0500e2ad,0x3d,1:0,0,7,+28.00,3.30

Figura 3.24 – Detalhes dos comandos enviados e recebidos pelo concentrador.

Cada sensor possui um painel individual que apresenta sua tensão de alimentação, sua temperatura e a taxa de erro de envio de dados, tal como representado pela Figura 3.25.

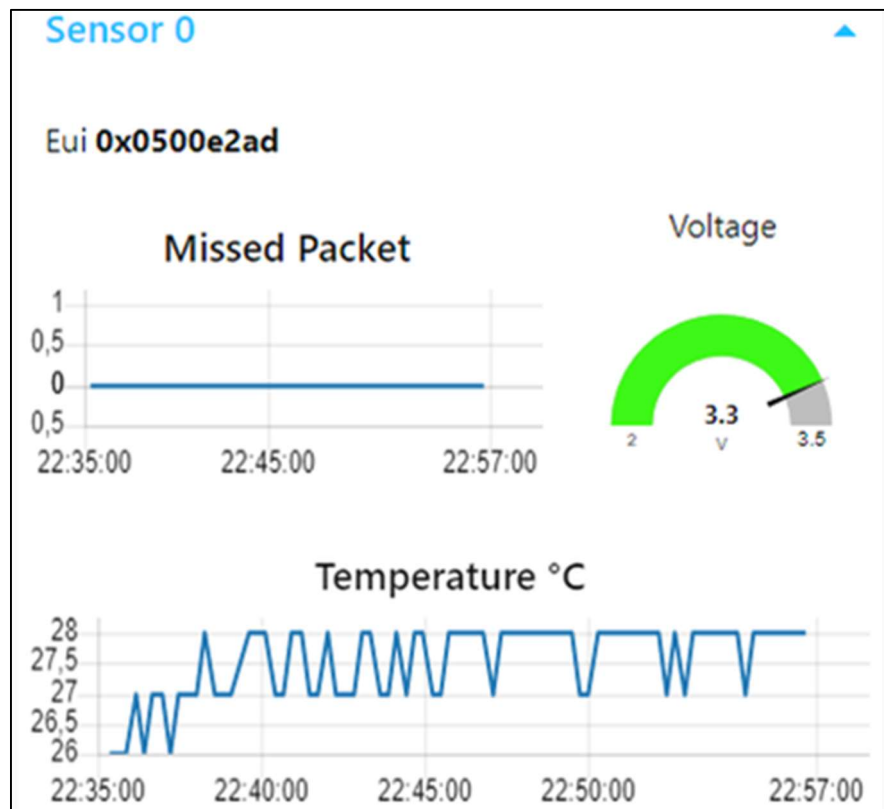


Figura 3.25 – Detalhe do acompanhamento de cada sensor.

Capítulo 4

Procedimentos Operacionais de Instalação e Validação do Protótipo

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo visa detalhar as atividades desenvolvidas durante as instalações do aparato sensorial junto às instalações na subestação de Parnaíba/PI, pertencente à área de concessão da ARGO Energia, no período entre 23 e 26/11/2021. O principal objetivo da visita técnica realizada para a subestação de Parnaíba foi então a instalação dos sensores que visam à medição de corrente de fuga por meio das bobinas de Rogowski, as quais foram instaladas em um arranjo de chaves seccionadoras invertidas presentes na respectiva subestação.

4.2. INSTALAÇÃO DO APARATO SENSORIAL EM SUBESTAÇÃO PILOTO

O aparato sensorial responsável por realizar a medição da corrente de fuga nos isoladores foi então instalado no conjunto de chaves seccionadoras invertidas. Assim, cada chave deveria ser envolvida por uma bobina de Rogowski. Em adição, um sensor seria também instalado nas proximidades do arranjo e este reuniria a soma das medições de corrente de fuga, bem como medidas de um sensor de variáveis ambientais e de um sensor de partículas de poeira, conforme o diagrama da Figura 4.1.

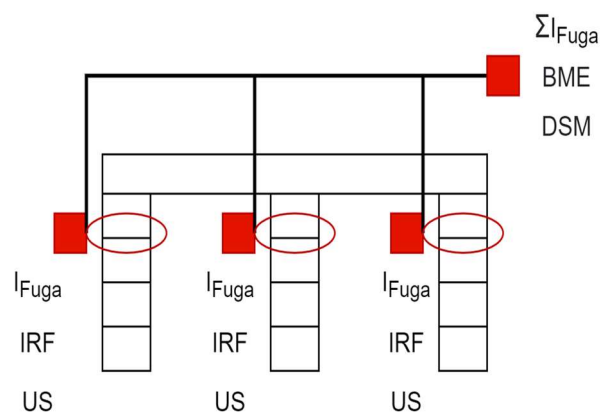


Figura 4.1 – Esquemática de instalação do sensor de medição da corrente de fuga.

A instalação do protótipo do sensor foi realizada pela equipe de manutenção da ARGO Energia. As Figuras 4.2 a 4.11 apresentam as etapas e os detalhes da instalação.

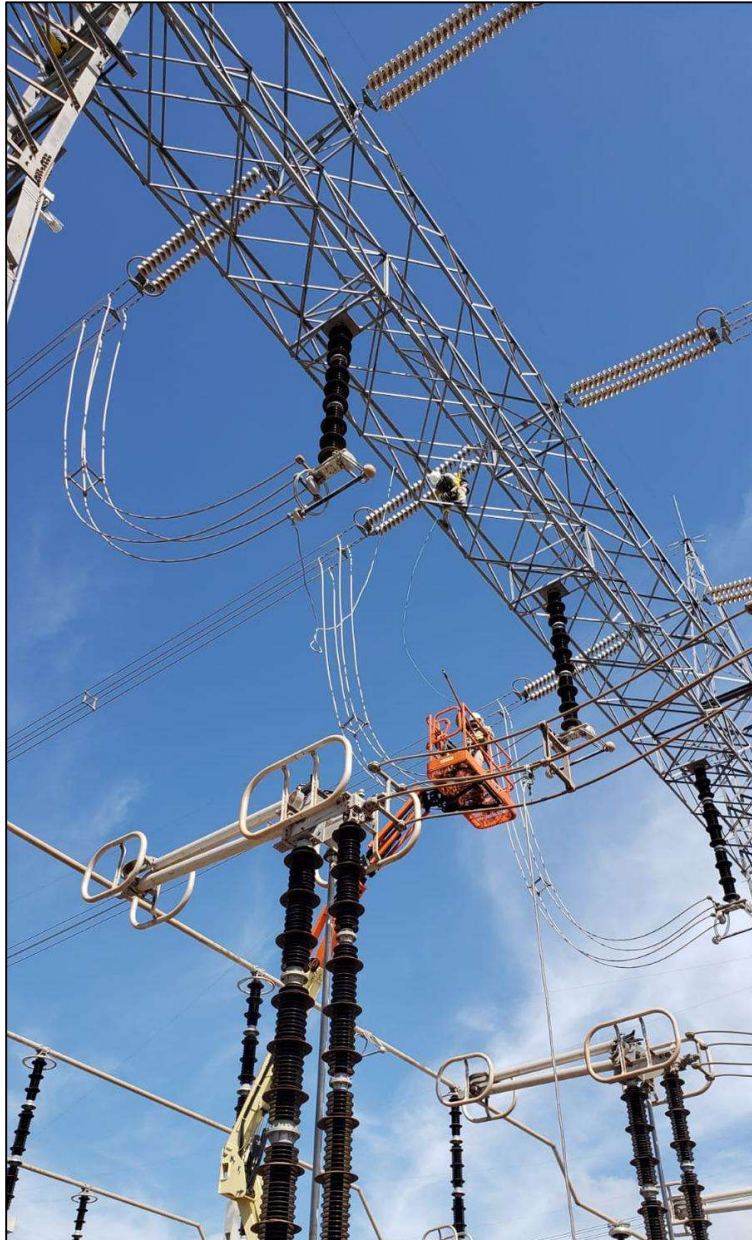


Figura 4.2 – Arranjo de chaves seccionadoras invertidas nas quais foram instalados o protótipo do sensor.

Além disso, conforme comentado anteriormente, previu-se que a comunicação entre o protótipo instalado e o centro de comando seria feita de forma wireless, utilizando-se o protocolo de comunicação LoRa, capaz de realizar comunicação de longo alcance utilizando uma baixa potência.



Figura 4.3 – Detalhe da instalação da bobina de Rogowski em uma das chaves seccionadoras.



Figura 4.4 – Detalhe da instalação da bobina de Rogowski em uma das chaves seccionadoras.

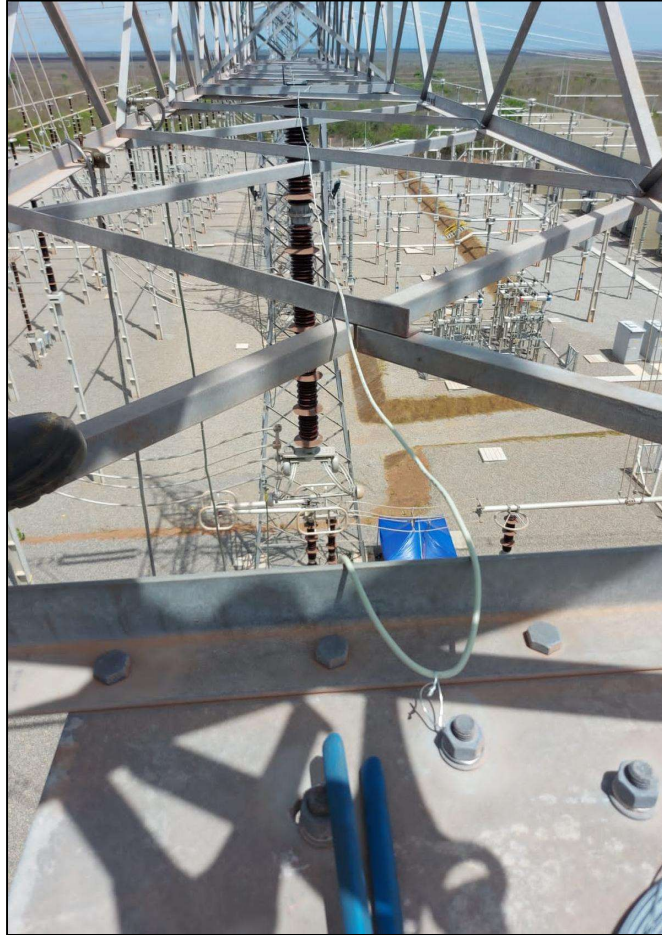


Figura 4.5 – Detalhe do cabeamento utilizado para a instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras.

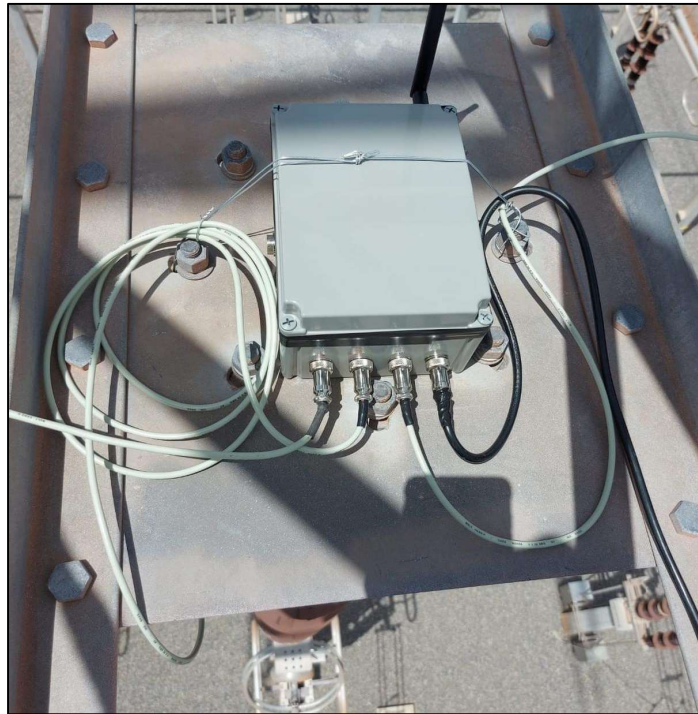


Figura 4.6 – Protótipo do sensor instalado no arranjo das chaves seccionadoras.

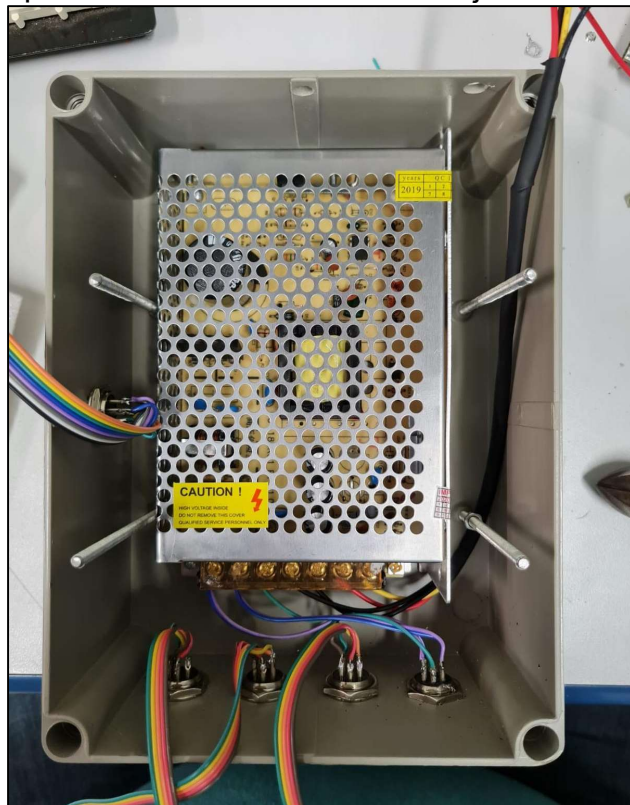


Figura 4.7 – Detalhe da parte interna do protótipo do sensor instalado no arranjo das chaves seccionadoras.



Figura 4.8 – Detalhes do processo de instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras (I).

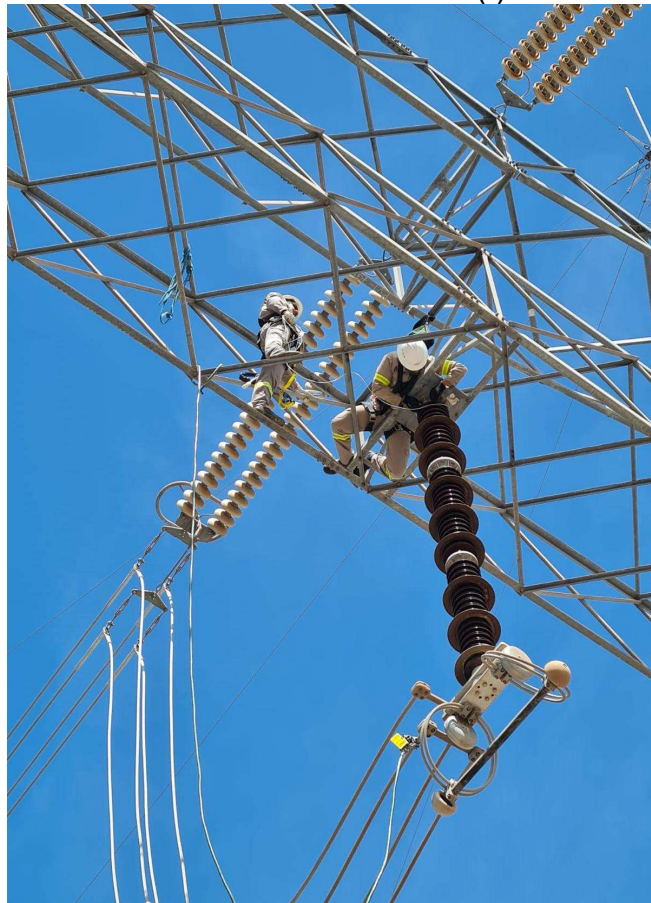


Figura 4.9 – Detalhes do processo de instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras (II).



Figura 4.10 – Detalhes do processo de instalação do protótipo do sensor no arranjo das chaves seccionadoras (III).

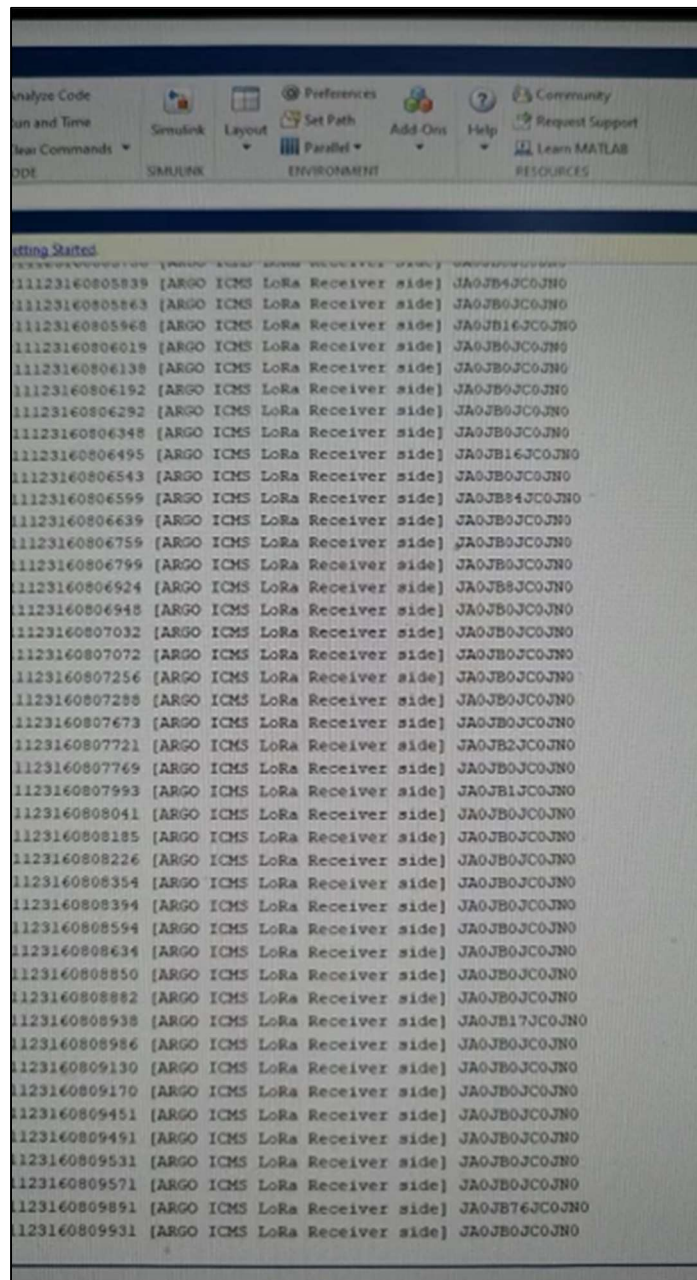


Figura 4.11 – Detalhes do funcionamento do protótipo do sensor instalado no arranjo das chaves seccionadoras e de sua comunicação com computador no centro de comando utilizando a comunicação LoRa.

A instalação do protótipo do sensor desenvolvido junto ao arranjo de chaves seccionadoras ocorreu conforme o previsto. Além disso, foi possível verificar o funcionamento correto não apenas do sensor, mas da comunicação entre este e o computador instalado na casa de comando.

Desta forma, foi então possível aquirir os dados do sensor de corrente de fuga. Tais informações são essenciais e serão utilizadas em trabalhos futuros para

auxiliar na construção do sistema inteligente de auxílio de tomada de decisão quanto ao depósito de contaminantes em isoladores.

4.3. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS PELO APARATO SENSORIAL

A partir dos dados coletados foram realizadas duas análises para verificar o comportamento da corrente de fuga. A primeira análise consistiu na avaliação do valor médio desta variável ao longo do período de um dia. Assim, os gráficos apresentados nas Figuras 4.12 a 4.14 são referentes ao comportamento médio das medições de fuga ao longo das horas do dia, junto às fases A, B e C, respectivamente.

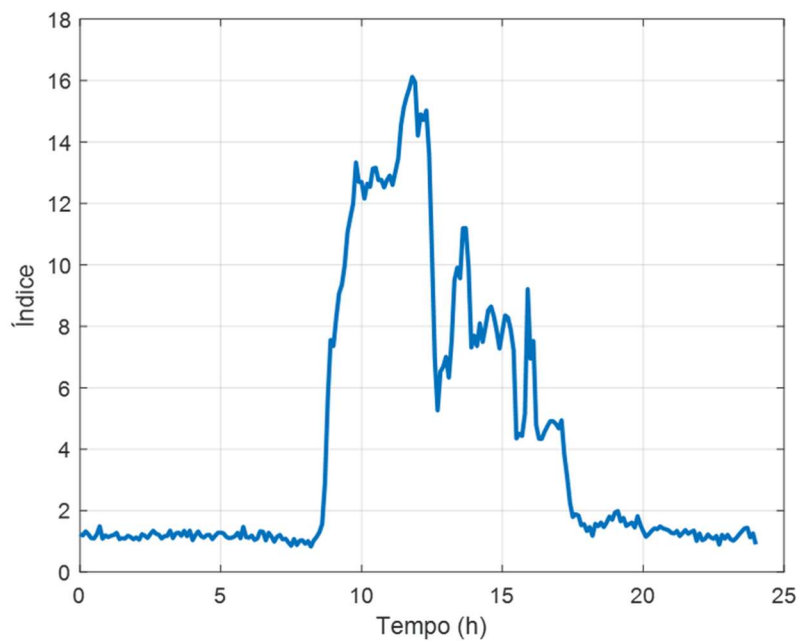


Figura 4.12 – Comportamento médio da corrente de fuga na fase A.

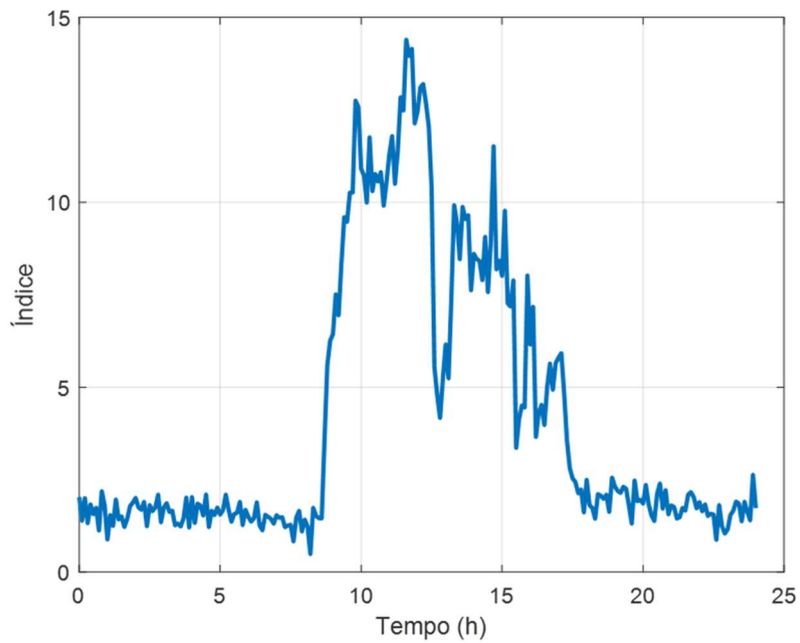


Figura 4.13 – Comportamento médio da corrente de fuga na fase B.

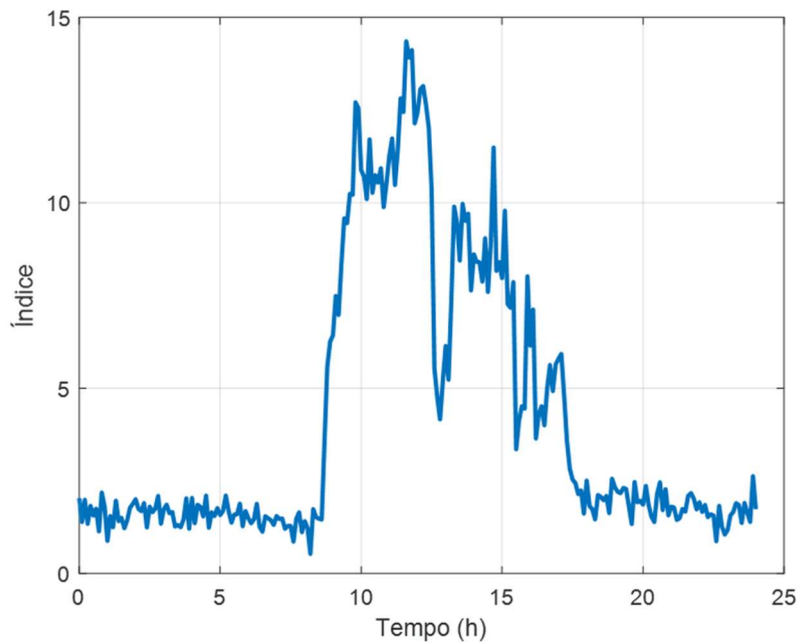


Figura 4.14 – Comportamento médio da corrente de fuga na fase C.

Por fim, ressalta-se que a equipe da ARGO foi solícita às demandas necessárias para a realização das atividades durante a instalação e, conseqüentemente, para que todos os objetivos fossem alcançados.

4.4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TENDÊNCIAS

Além da análise do comportamento médio da série temporal da variável de corrente de fuga, também foi realizada uma análise sobre a tendência do comportamento desta variável.

Desta forma, os gráficos de barra apresentados nas Figuras 4.15 a 4.17 mostram qual a tendência de aumento das correntes a cada hora do dia. Novamente, os gráficos apresentados são referentes às fases A, B e C, respectivamente.

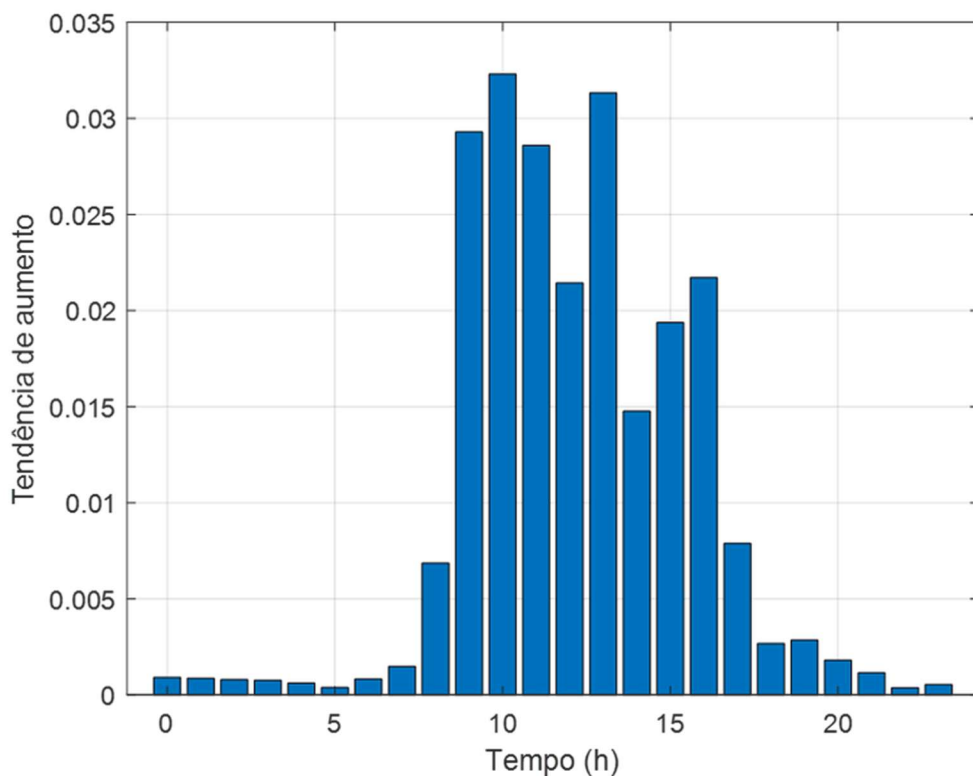


Figura 4.15 – Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase A.

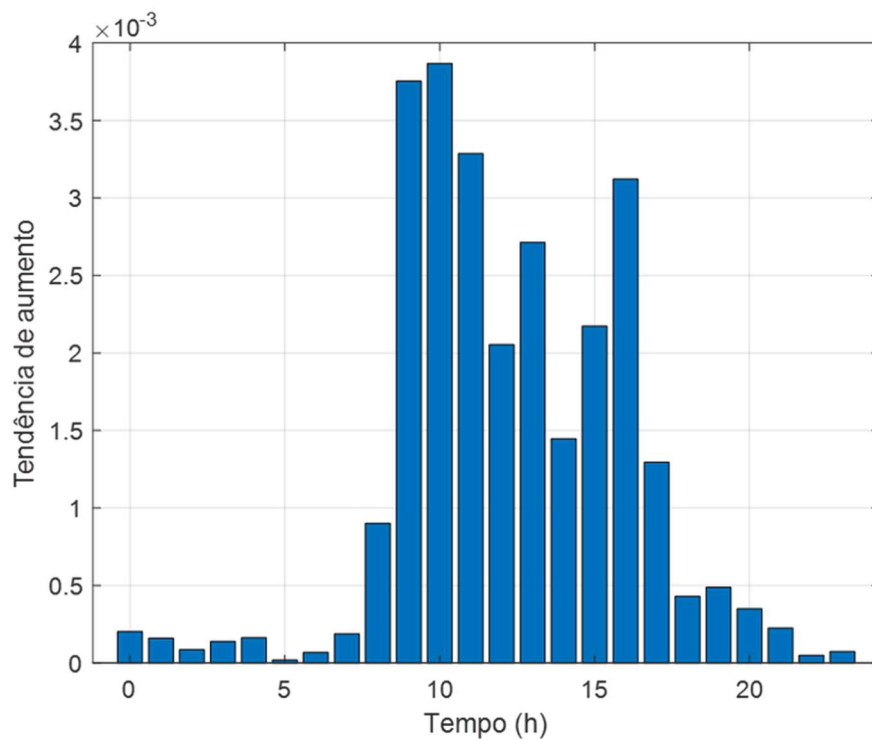


Figura 4.16 – Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase B.

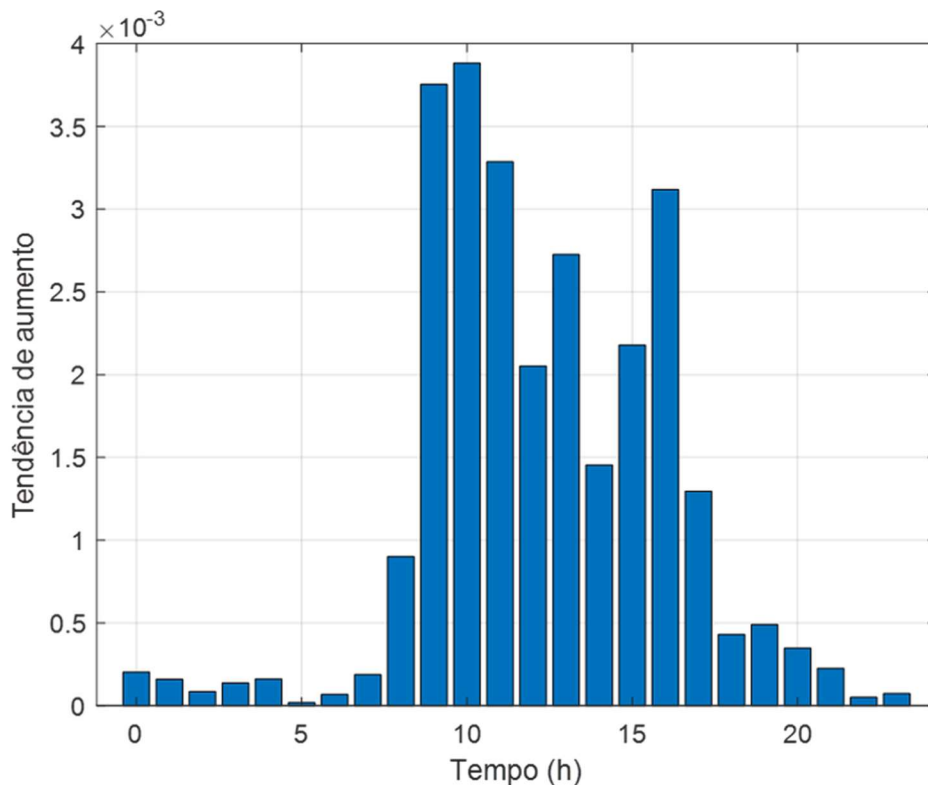


Figura 4.17 – Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase C.

Avaliando os gráficos apresentados, nota-se que o comportamento da corrente de fuga é similar para as três fases, indicando uma aparente uniformidade no funcionamento da isolamento dos equipamentos de cada uma das fases.

Além disso, observando-se as curvas apresentadas, nota-se dois momentos nos quais a grandeza da corrente de fuga apresenta picos em sua magnitude, um ocorrendo no meio do dia e outro no período da tarde. Este comportamento é similar ao de curvas encontradas na análise de radiação solar incidente e temperatura ao longo do dia, e também em curvas de demanda de energia. Desta forma, os picos de corrente podem estar relacionados com períodos de maior incidência solar ou períodos nos quais há um aumento na demanda de energia.

4.5. ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS

Além das análises citadas na seção anterior, está sendo também possível a realização de aprimoramentos envolvendo o entendimento das descargas parciais, tal como pode ser comprovado pela Figura 4.18.

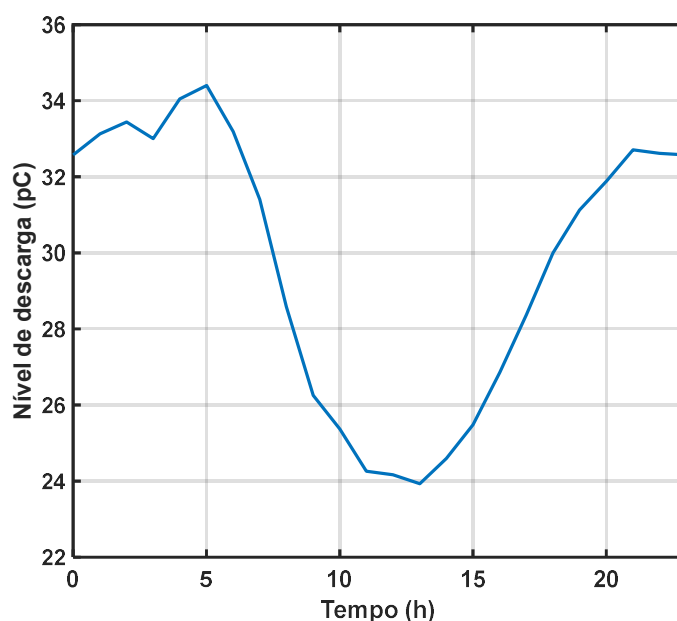


Figura 4.18 – Qualificação do nível de descargas em função do dia.

A partir da coleta com mais de três meses de dados sobre a corrente de fuga presente nas chaves seccionadoras, observa-se na análise da Figura 4.18 que há ocorrência de descargas parciais em todo o momento. Adicionalmente, testemunha-se que as suas maiores magnitudes médias se concentram no horário compreendido entre 20h00 e 06h30, sendo que seu pico está em torno das 05h00. Por outro lado, aquelas de menores magnitudes estão compreendidas no intervalo entre 11h00 e 14h00.

A qualificação do nível de descargas parciais em 2021 e 2022 pode ser conferida na Figura 4.19.

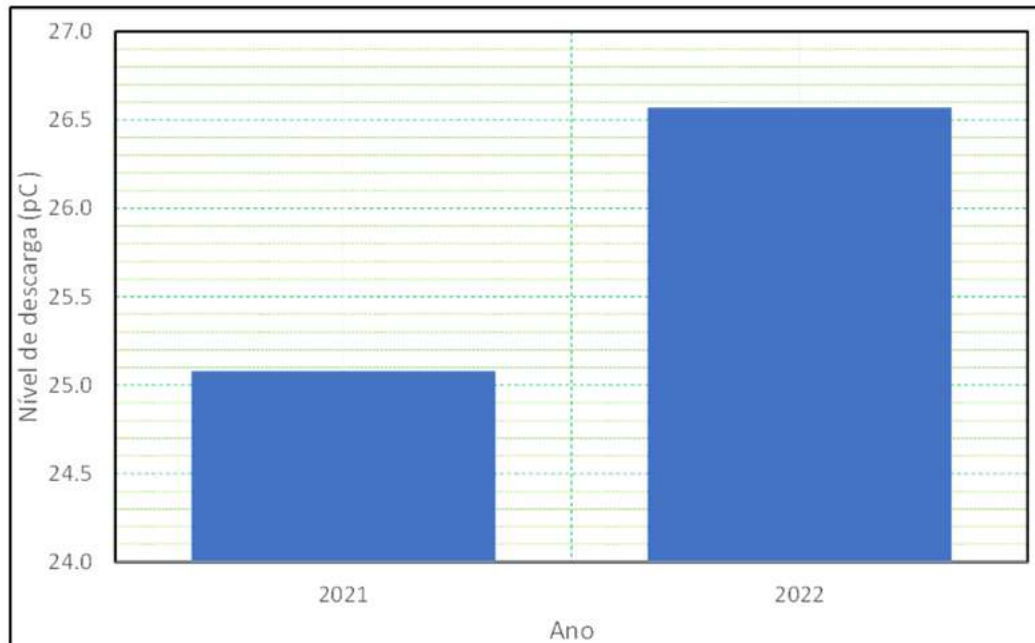


Figura 4.19 – Qualificação do nível de descargas em função do ano (2021 e 2022).

A partir da Figura 4.20, observa-se então que há um aumento crescente das descargas parciais a partir de dezembro/2021. Já a Figura 4.21 ilustra o comportamento médio dessas descargas parciais ao longo do dia, o qual foi contabilizado desde o início da aquisição de dados, ou seja, 23 de novembro de 2021.

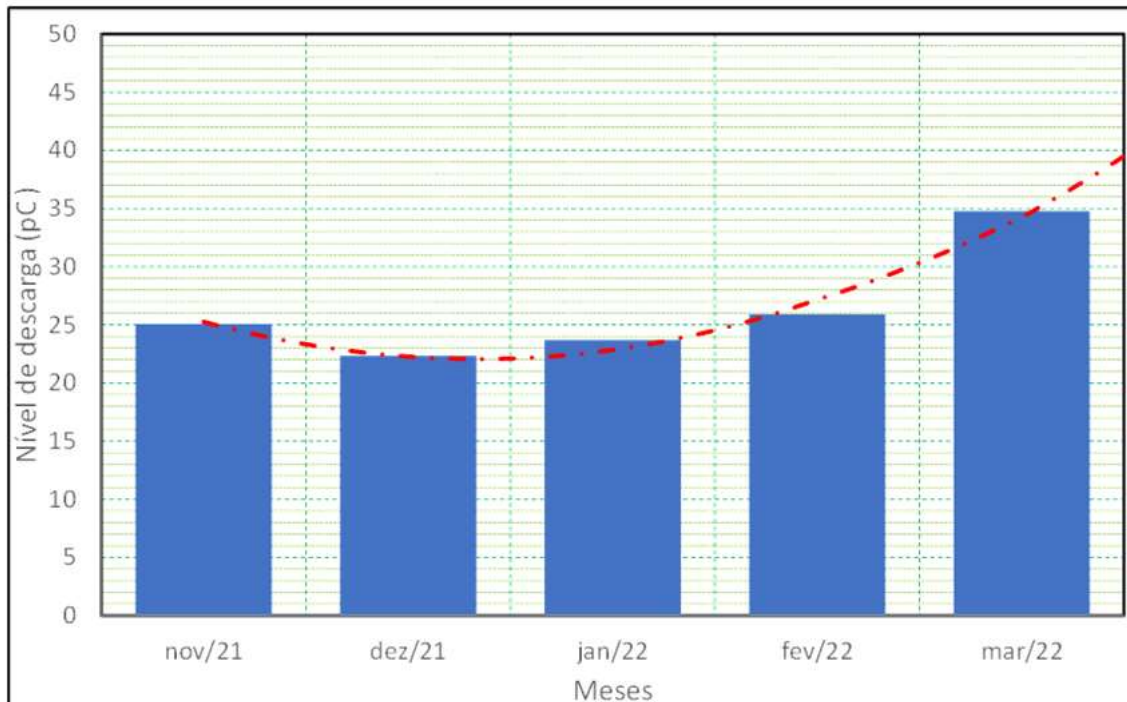


Figura 4.20 – Qualificação do nível de descargas desde o início da aquisição de dados.

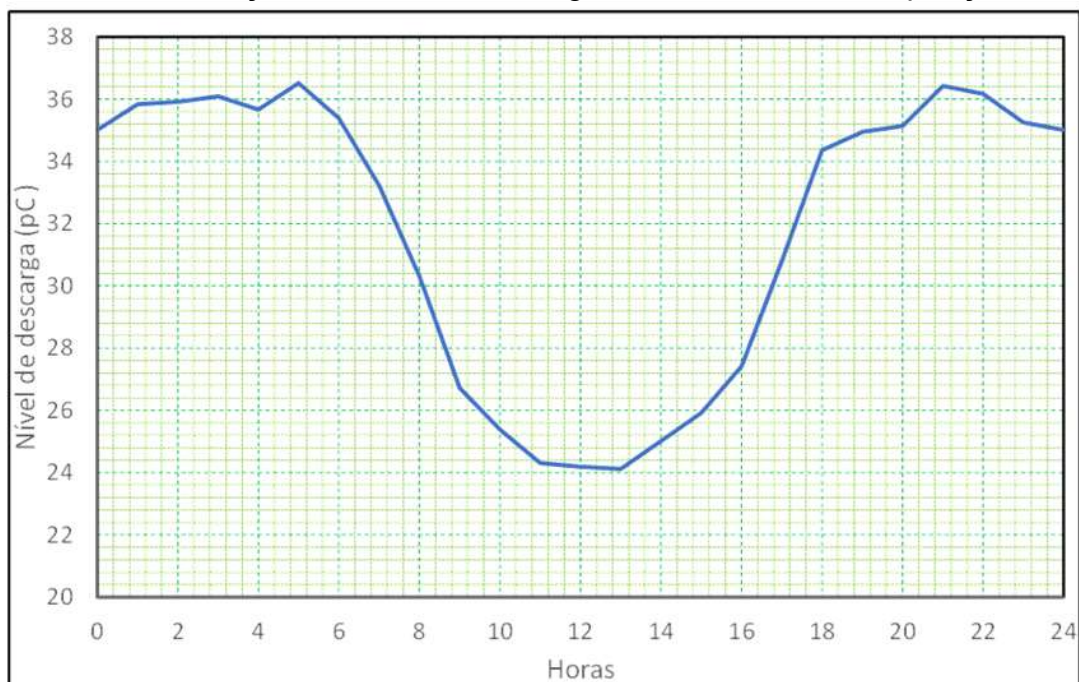


Figura 4.21 – Comportamento médio do nível de descargas em função das horas do dia.

Frente à compilação constituída com meses de dados sobre a corrente de fuga, testemunha-se então que as suas maiores magnitudes médias se concentram no horário compreendido entre 18h00 e 06h30, sendo que seu pico está em torno das 05h00. Por outro lado, aquelas de menores magnitudes estão compreendidas no intervalo entre 10h00 e 14h00.

Capítulo 5

Conclusões e Aspectos de Continuidade do Trabalho

5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Conforme citado nos capítulos introdutórios desta dissertação de Mestrado, uma das causas mais comuns de interrupções em sistemas elétricos de potência é o surgimento das correntes de fuga em seus isoladores, as quais são intensificadas em ambientes sob poluição industrial ou com atmosfera muito salina, tal como aquela encontrada no litoral.

Para tanto, desenvolveu-se então um protótipo de aparato sensorial de baixo custo visando o monitoramento de correntes de fuga, as quais possam ocorrer nas superfícies externas de isoladores presentes em subestações de transmissão de energia elétrica.

Este aparato sensorial foi constituído por uma bobina de Rogowski, que permite o monitoramento de correntes de fuga sem a necessidade de interrupção do circuito. Já o sistema para a transmissão dos dados foi fundamentado na tecnologia LoRa, permitindo-se então a comunicação de longo alcance.

A modularização ou compartimentação dos sensores permite um nível de segurança e robustez da aplicação, não somente pela rápida substituição de algum componente quando necessário, mas também pelo seu rápido desenvolvimento em termos de software.

Conforme apontado, o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento segue a filosofia de implementação com Sistema Operacional, o que permite um excepcional controle dos recursos computacionais utilizados.

Um outro fator crítico no desenvolvimento da pesquisa é o alcance dos sistemas de comunicação, sendo que para tais situações a filosofia de comunicação

LoRa foi a mais adequada. Para tanto, a fim de garantir confiabilidade em campo, o hardware escolhido para o projeto fora submetido a diversos ensaios visando caracterizar a sua atuação com e sem obstáculos.

Todo o aparato sensorial foi testado experimentalmente, sendo esses instalados na subestação de Parnaíba/PI, pertencente à área de concessão da ARGO Energia. Os resultados obtidos atestam que o sistema desenvolvido consegue obter as correntes de fuga de maneira bem satisfatória, sendo que os perfis dessas medições são também condizentes com aquelas observadas na prática.

Tendo o protótipo instalado, destaca-se o sucesso de todas as integrações utilizadas em conjunto, tanto em relação ao hardware quanto ao software. É importante salientar também a robustez dos sistemas Pilotos, que se encontra em pleno funcionamento e enviando dados, desde o primeiro momento da instalação.

A relação obtida entre a corrente de fuga e a radiação solar e a demanda de energia após a análise dos dados obtidos do protótipo, apresentada no Capítulo 4, também demonstra um resultado significativo na compreensão do comportamento da magnitude da corrente de fuga nos isoladores.

O desenvolvimento deste protótipo possibilitará para instalações de distribuição e transmissão de energia o monitoramento de contaminantes e poluentes aglomerados em sistemas de isolação (isoladores, para-raios, buchas). Com os dados obtidos no monitoramento será possível identificar e sinalizar a necessidade de procedimentos de manutenção preventiva a fim de se evitar eventuais fugas de corrente que sejam elevadas.

5.2. ASPECTOS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO

Como continuidade do trabalho, frente ao protótipo de aparato sensorial para medição de corrente de fuga em isoladores de subestações de energia elétrica, podem-se citar as seguintes frentes de pesquisa que visam complementar o trabalho realizado:

- Desenvolvimento de técnicas alternativas que permitem medir a corrente de fuga sem a inserção da bobina de Rogowski, visto que a mesma necessita de desligamento da linha para ser instalada.
- Desenvolvimento de sistema inteligente que visa estimar o grau de sujidade presente nos isoladores por intermédio da corrente de fuga.

- Desenvolvimento de sistema de apoio à decisão com o intuito de sinalizar a necessidade de procedimentos de manutenção preventiva a fim de se evitar eventuais fugas de corrente que sejam elevadas.

A continuidade e ampliação dos estudos dos aspectos de poluição em isoladores possibilitará um grande avanço no uso desses componentes em instalações de transmissão e distribuição: o proprietário dessas instalações poderá tomar melhores decisões no momento de escolha do tipo de isolador no momento da implantação dos ativos, ou mesmo no futuro, quando for necessária a substituição desses componentes, e, será possível também realizar um melhor plano de manutenção dos componentes ampliando a vida útil projetada para o isolador danificado por poluição.

Considerando o valor de aproximadamente R\$ 5.000,00 para construção de um protótipo e o sucesso em sua integração, o monitoramento da corrente de fuga associado poderia ser expandido para as demais subestações da Argo de forma a ampliar os dados para análise.

De forma complementar a este estudo, será importante avaliar os aspectos técnicos e regulatórios previstos em Editais de Leilões de Transmissão, que definem os níveis de poluição na região onde serão construídos os empreendimentos e a remuneração adequada para construir, operar e manter as instalações. Será necessário entender se o nível de poluição previsto nestes Editais é aplicável e caso não seja, avaliar as consequências para o Sistema Elétrico Brasileiro da instalação de isoladores inadequados nas instalações de transmissão.

5.3. TRABALHOS PUBLICADOS

Como informação complementar, paralelamente às atividades relacionadas em face com o desenvolvimento da dissertação de mestrado, os seguintes trabalhos foram também publicados em anais de congressos técnico-científicos, os quais são tanto de abrangência nacional/regional (*XIV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission*) como internacional (*IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing*), ou seja:

- LOPES, Sofia Moreira de Andrade; YOSHIZUMI, Victor Hideki; TAVARES, Beatriz de Lima; MOREIRA, Wallace Honorato; BARQUETE, Ana Cláudia Carvalho; FLAUZINO, Rogério Andrade; SPATTI, Danilo Hernane; SILVA,

Ivan Nunes. "Overhead Line Insulators Performance Degradation Analysis Due to Environmental Pollution", ***Proceedings of the XIV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission***, pp. 1-10, Rio de Janeiro, 2022.

- SILVA, Ivan Nunes; SPATTI, Danilo Hernane; YOSHIZUMI, Victor Hideki; OPES, Sofia Moreira de Andrade; FLAUZINO, Rogério Andrade; TAVARES, Beatriz de Lima; BARQUETE, Ana Cláudia Carvalho; MOREIRA, Wallace Honorato. "Condition Monitoring of Power Insulators Using Intelligent Techniques-A Survey", ***Proceedings of the IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing***, pp. 1-6, Ixtapa (México), 2022.

Referências Bibliográficas

- [1] C. A. I. FONTANELLA; A. P. N. OLIVEIRA; D. HOTZA, “Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana”. *Matéria* (Rio J.), vol.13, no. 4, pp. 624-635, 2008.
- [2] A. L. CHINELATTO; D. P. F. SOUZA, “Porcelanas elétricas aluminosas: Parte I - Revisão da literatura”. *Cerâmica*, vol. 50, no. 313, pp. 62-68, 2004.
- [3] A. L. CHINELATTO; D. P. F. SOUZA, “Porcelanas elétricas aluminosas: Parte II - Desenvolvimento da microestrutura e sua influência no módulo de ruptura”. *Cerâmica*, vol. 50, no. 315, pp. 172-184, 2004.
- [4] E. O. ABDELAZIZ; P. CHARLOMAN; M. JAVORONOKOV, “Modeling the behavior of the electric insulators in polluted desartic medium”. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol.1, no. 1, pp. 77-81, 2006.
- [5] SWARNO; A. PRADANA, “Properties of leakage current on 20 kV ceramic insulators and computer simulation based on electrical equivalent circuit”. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. II, 5 pp., 2010.
- [6] K. F. PORTELLA; F. PIAZZA; P. C. INONE, S. RIBEIRO JR; M. S. CABUSSÚ; D. P. CERQUEIRA; C. S. S. CHAVES, “Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador”. *Química Nova*, vol. 31, no. 2, pp. 340-348, 2008.
- [7] J. LIEBERMANN, “Electric behavior of porcelain insulators in polluted environments”. *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 81, no. 6, pp. 31-36, 2002.
- [8] J. LIEBERMANN, “New effective ways toward solving the problem of contamination of porcelain insulators”. *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 43, no. 1-2, pp. 55-64, 2002.

- [9] S. M. GUBANSKI; A. E. VLASTOS, "Wettability of naturally aged silicone and EPDM composite insulators". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1527-1535, 1990.
- [10] S. KOBAYASHI; Y. MATSUZAKI; Y. ARASHITANI; R. KIMATA, "Development of composite insulators for overhead lines (Part 2)". *Furukawa Review*, no. 21, pp. 56-61, 2002.
- [11] P. T. TSARABARIS; C. G. KARAGIANNOPOULOS; P. D. BOURKAS; N. J. THEODOROU, "An experimental investigation of leakage current on high voltage contaminated insulators". *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 30-34, 2003.
- [12] SUWARNO; P. JUNIKO, "Roles of fog conductivity and humidity on leakage current of ceramic insulators". *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 282-287, 2009.
- [13] M. AFENDI; M. PIAH; A. DARUS, "Leakage current analysis of polymer insulating material with variable contaminant flow rate". *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 5 pp., 2002.
- [14] M. AMIN; S. AMIN; M. ALI, "Monitoring of leakage current for composite insulators and electrical devices". *Rev. Adv. Mater. Sci.*, no. 21, pp.14-34, 2009.
- [15] A. S. ALMAD; H. AHMAD; M. A. SALAM; S. AHMAD, "Regression technique for prediction of salt contamination severity on high voltage insulators". *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 1, pp. 218-221, 2000.
- [16] A. N. JAHROMI; A. H. EL-HAG; S. H. JAYARAM; E. A. CHERNEY; M. SANAYE-PASAND; H. MOHSENI, "A neural network based method for leakage current prediction of polymeric insulators". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 506-507, 2006.
- [17] J. LI; W. SIMA; C. SUN; S. A. SEBO, "Use of leakage currents of insulators to determine the stage characteristics of the flashover process and contamination

- level prediction". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 2, pp. 490-501, 2010.
- [18] X. JIANG; Y. SHI; C. SUN; Z. ZHANG, "Evaluating the safety condition of porcelain insulators by the time and frequency characteristics of LC based on artificial pollution tests". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 2, pp. 481-489, 2010.
- [19] X. U. XIAONING; N.I.E. YIXIONG; C. HANXIANG, "Application of fuzzy model identification on insulation detection of insulator strings". *Asian Journal of Information Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 24-27, 2006.
- [20] SHAIK, A. G.; MAHELA, O. P., "Power quality assessment and event detection in hybrid power system". *Electric Power Systems Research*, vol. 161, pp. 26-44, 2018.
- [21] A. R. VERMA; B. S. REDDY, "Interpretation of surface degradation on polymeric insulators". *Engineering Failure Analysis*, vol. 95, pp. 214-225, 2019.
- [22] L. P. S. PETRI, *et al.*, "A portable system for the evaluation of the degree of pollution of transmission line insulators". *Energies*, vol. 13, no. 24, 6625, 2020.
- [23] D. ZHANG; S. CHEN, "Intelligent recognition of insulator contamination grade based on the deep learning of ultraviolet discharge image information". *Energies*, vol. 13, no. 19, 5221, 2020.
- [24] Y. HAO, *et al.*, "Experimental investigation on influence of shed parameters on surface rainwater characteristics of large-diameter composite post insulators under rain conditions". *Energies*, vol. 13, no. 19, 5011, 2020.
- [25] A. GHASEMPOUR, "Internet of things in smart grid: architecture, applications, services, key technologies, and challenges". *Inventions*, vol. 4, no. 1, 22, 2019.
- [26] P. N. THANH; M. Y. CHO; T. N. DA, "Insulator leakage current prediction using surface spark discharge data and particle swarm optimization based neural network". *Electric Power Systems Research*, vol. 191, 106888, 2021.

- [27] S. F. STEFENON, *et al.*, “Wavelet group method of data handling for fault prediction in electrical power insulators”. ***International Journal of Electrical Power & Energy Systems***, vol. 123, 106269, 2020.
- [28] D. MUSSINA, *et al.*, “Multi-modal data fusion using deep neural network for condition monitoring of high voltage insulator”. ***IEEE Access***, vol. 8, pp. 184486-184496, 2020.
- [29] M. KOOPALIPOOR, *et al.*, “Applying various hybrid intelligent systems to evaluate and predict slope stability under static and dynamic conditions”. ***Soft Computing***, vol. 23, no. 14, pp. 5913-5929, 2019.
- [30] R. D. FUCHS, ***Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas***. 1. ed. Itajubá: LTC/EFEI, 1977.
- [31] C. P. G. GUEDES, ***Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy***. Dissertação (Dissertação de Mestrado) – UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, julho 2015.
- [32] A. S. AHMAD; P. S. GHOSH; S. A. K. ALJUNID; H. AHMAD, “Estimation of salt contamination level on the high voltage insulators surfaces during rainy season using artificial neural network”. ***IEE Conference Publication***, no. 488, pp. 303-308, 2002, DOI: 10.1049/cp:20020052.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***IEC/TS 60815-1***: Seleção e dimensionamento de isoladores para alta-tensão para uso sob condições de poluição Parte 1: Definições, informações e princípios gerais. Rio de Janeiro, p. 56. 2014, ISBN: 978-85-07-05280-7.
- [34] N. BASHIR; H. AHMAD, “A neural network based method for the diagnosis of ageing insulators”, ***IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications***, Kuala Lumpur, 2009, pp. 41-46, DOI: 10.1109/ISIEA.2009.5356499.
- [35] R. M. CAPELINI, ***Localização de Cadeias de Isoladores Defeituosas em Linhas de Transmissão Através de Redes Neurais***, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2011.

- [36] CIGRÉ, ***Polluted Insulators: A Review of Current Knowledge***. Paris, 2000.
- [37] P. CLINE; W. LANNES; G. RICHARDS, “Use of pollution monitors with a neural network to predict insulator flashover”. ***Electric Power Systems Research***, vol. 42, no. 1, pp. 27-33, 1997, DOI: 10.1016/S0378-7796(96)01173-X.
- [38] M. FARZANEH; W. A. CHISHOLM, “Insulators for icing and polluted environments”. ***IEEE Press***, p. 708, 2009. ISBN 978-0-470-28234-2.
- [39] J. A. R. HERNANZ; J. J. C. MARTÍN; J. M. GOGESCOECHEA; I. Z. BELVER, “Insulator pollution in transmission lines”. ***Renewable Energy and Power Quality Journal***, vol. 4, no. 1, pp. 124-130, 2006, DOI: 10.24084/repqj04.256.
- [40] D. R. MELLO; R. T. D. COSTA JR; J. T. BATISTA; M. E. MELO, “Avaliação do grau de poluição em instalações de transmissão, subestações e distribuição”. ***Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL***, 2001.
- [41] V. J. NARAYANAN; M. SIVAKUMAR; K. KARPAGAVANI; S. CHANDRASEKAR, “Prediction of flashover and pollution severity of high voltage transmission line insulators using wavelet transform and fuzzy C-means approach”. ***Journal of Electrical Engineering and Technology***, vol. 9, no. 5, pp. 1677-1685, 2014, DOI: 10.5370/JEET.2014.9.5.1677.
- [42] K. F. PORTELLA; F. PIAZZA; P. C. INONE; S. RIBEIRO JR.; M. S. CABUSSÚ; D. P. CERQUEIRA; C. S. S. CHAVES; “Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador”. ***Química Nova***, vol. 31, no. 2, pp. 340-348, 2008, DOI: 10.1590/S0100-40422008000200029.



EESC • USP