

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

**Sofia Moreira de Andrade Lopes**

**Desenvolvimento de sistema de monitoramento de  
condição de isolamento para análise da performance de  
isoladores de alta tensão**

**São Carlos**

**2024**



**Sofia Moreira de Andrade Lopes**

**Desenvolvimento de sistema de monitoramento de  
condição de isolamento para análise da performance de  
isoladores de alta tensão**

Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Prof. Rogério Andrade Flauzino

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

**São Carlos**

**2024**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE 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).

L864d            Lopes, Sofia Moreira de Andrade  
                  Desenvolvimento de sistema de monitoramento de  
                  condição de isolação para análise da performance de  
                  isoladores de alta tensão / Sofia Moreira de Andrade  
                  Lopes; orientador Rogério Andrade Flauzino. São Carlos,  
                  2024.

                  Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em  
                  Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas  
                  Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da  
                  Universidade de São Paulo, 2024.

                  1. Isoladores. 2. Linhas de transmissão. 3.  
                  Corrente de fuga. 4. Sistema de monitoramento de  
                  condição. 5. Sensoriamento remoto. 6. Poluição. I.  
                  Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **SOFIA MOREIRA DE ANDRADE LOPES**.

Título da tese: "Desenvolvimento de sistema de monitoramento de condição de isolamento para análise da performance de isoladores de alta tensão".

Data da defesa: 07/06/2024.

### Comissão Julgadora

### Resultado

**Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADA

---

**Profa. Dra. Fernanda Caseño Trindade Arioli**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

---

**Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer**  
(Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR)

APROVADA

---

**Prof. Dr. Ruy Alberto Pisani Altafim**  
(Universidade Federal da Paraíba/UFPB)

APROVADA

---

**Prof. Associado Silvio Giuseppe Di Santo**  
(Escola Politécnica/EP-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**



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por sempre me colocar no caminho que devo seguir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino, pela orientação e auxílio no desenvolvimento deste projeto e pelo apoio ao longo de minha trajetória profissional. Agradeço também ao grupo do projeto de P&D no qual este trabalho está inserido. Além disso, expressei meu imenso agradecimento a todos os funcionários da USP-São Carlos, em especial do Departamento de Engenharia Elétrica, por sempre estarem dispostos a auxiliar e ajudar durante minha trajetória acadêmica.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de doutorado, sem a qual esta pesquisa não seria possível.

Por fim, agradeço à minha família e amigos pelo amor e apoio, e por me incentivarem a sempre buscar meus objetivos. À minha mãe, Solange, que me inspirou a seguir a pós-graduação e que me trouxe meu primeiro contato com este mundo. Ao meu pai, Alencar, que me motivou a escolher a engenharia como profissão. Aos meus irmãos Ulisses e Tales, que são meus companheiros de vida. À minha melhor amiga, Marina, por estar sempre disponível para me ouvir e me apoiar. À minha família em São Carlos, José e Marias, por serem meu lar fora de casa. E, em especial, ao meu companheiro de vida, Lucas Sales, por estar comigo todos os dias, me apoiar e caminhar comigo em todos os momentos.





## RESUMO

LOPES, S. M. A. **Desenvolvimento de sistema de monitoramento de condição de isolamento para análise da performance de isoladores de alta tensão.** 2024. 174p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Isoladores de alta tensão têm seu funcionamento intimamente relacionado com a operação correta e segura das linhas de transmissão (LTs) do sistema elétrico de potência (SEP), sendo os elementos responsáveis por fornecer suporte mecânico aos alimentadores e por isolar eletricamente tais elementos, evitando contato direto com a estrutura da linha. Por operarem em ambientes externos, os isoladores ficam expostos às condições ambientais adversas, tais como o acúmulo de poluição em sua superfície. A camada superficial de contaminantes, combinada com a umidade do ar, pode levar a passagem de corrente de fuga na superfície do equipamento, o que degrada o material e eventualmente desencadeia a ocorrência de uma ruptura no isolamento. Desta forma, a deposição de contaminantes na superfície dos isoladores é a principal causa responsável pela degradação de sua performance e pela ocorrência de falhas em seu funcionamento. Para evitar a falha do equipamento, processos de manutenção preventiva realizam a lavagem periódica dos isoladores para remoção da camada de contaminantes. Nesta tese de doutorado, foram desenvolvidos experimentos laboratoriais com isoladores naturalmente contaminados retirados de uma linha de transmissão. A partir destes experimentos, foi possível observar que o acúmulo de contaminantes na superfície dos isoladores de alta tensão promove uma degradação do desempenho elétrico deste equipamento quando combinado com umidade, mesmo após a remoção da poluição. Desta forma, o objetivo deste trabalho visou o desenvolvimento de um dispositivo de monitoramento, baseado em técnicas de sensoriamento de variáveis ambientais e elétricas, a fim de acompanhar os níveis de poluição e as características elétricas dos isoladores operando em ambientes poluídos. Assim, através do monitoramento permanente e contínuo destes equipamentos, espera-se que empresas do setor possam escolher o melhor momento para a limpeza dos isoladores, não apenas considerando fenômenos como ruptura do isolamento, mas também levando em conta a degradação na performance do equipamento imposta pelo acúmulo prolongado da poluição ao longo de sua operação e a potencial redução de sua vida útil.

**Palavras-chave:** Isoladores, Linhas de transmissão, Corrente de fuga, Sistema de monitoramento de condição, Sensoriamento remoto, Poluição.



## ABSTRACT

LOPES, S. M. A. **Development of condition monitoring system for high voltage insulators operating under saline pollution conditions.** 2024. 174p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Overhead line insulators provide mechanical support for feeders and electrical insulation between feeders and the metallic structure. The equipment proper operation is vital for transmission lines safe operation. During its operation, insulators are exposed to adverse environmental conditions, mainly pollution. The deposition of pollutants on the surface of the insulator, combined with moisture in the air, can lead to leakage currents flowing through its surface, causing degradation of its operation and eventually leading to the occurrence of flashovers. Therefore, the presence of pollution layer on the surface of insulators is the main cause of their early failure. To avoid such problems, companies carry out periodic washing of the insulators to remove the layer of contaminants as a preventive maintenance measure. In this thesis, experimental tests were carried out with overhead line insulators to verify the electrical performance of such equipment after being naturally polluted during its one year of operation in a high voltage transmission line. Upon analyzing the measurements, it was possible to observe that the accumulation of contaminants on the surface of high-voltage insulators promotes a degradation of the electrical performance of this equipment when combined with humidity, even after the removal of pollution. Thus, the objective of this work was to develop a monitoring device based on techniques for sensing environmental and electrical variables in order to track the pollution levels and electrical characteristics of insulators operating in polluted environments. It is expected that with continuous monitoring of such equipment, companies can optimize their maintenance processes, choosing the best time to clean the insulators, based on the degradation of the insulators over time and the reduction of their useful life and not only considering flashover occurrence.

**Keywords:** Isolators, Transmission lines, Leakage current, Condition monitoring system, Remote sensing, Contaminant layer.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um isolador de suspensão: 1- Campânula; 2 - Cimento; 3 - Dielétrico; 4 - Pino; 5 - Saia do isolador. Adaptado de Fuchs (1977) . . .	36
Figura 2 – Isoladores de suspensão - (a) Vista da parte superior; (b) Vista da parte inferior . . . . .	36
Figura 3 – Distribuição de temperatura ao longo do isolador durante o processo de passagem de corrente de fuga - Fonte: (ISHII; AKBAR; KAWAMURA, 1984) . . . . .	38
Figura 4 – Formação de bandas secas e ocorrência de descargas na superfície do isolador - Adaptado de Khatoon, Khan e Singh (2017) . . . . .	39
Figura 5 – Relação entre os indicadores DDSE e DDNS e a classificação da região de acordo com o grau de severidade de poluição - Fonte: (ABNT, 2014)	43
Figura 6 – Componentes que compõem a camada de hardware de um SE - Adaptado de (GANGULY, 2014) . . . . .	52
Figura 7 – Etapas para tradução do software desenvolvido até a instalação no SE - Adaptado de (NOERGAARD, 2014) . . . . .	54
Figura 8 – Elementos que compõe um microcontrolador padrão . . . . .	55
Figura 9 – Etapas do projeto de uma fonte de alimentação . . . . .	56
Figura 10 – Ilustração dos tipos de chirp utilizados na modulação. Fonte: (PRAJZLER, 2024) . . . . .	59
Figura 11 – Comparação entre diferentes valores de fator de espalhamento. Na imagem, o fator de dispersão é variado do seu valor mínimo (SF7) ao máximo (SF12) da esquerda para a direita. Fonte: (PRAJZLER, 2024)	60
Figura 12 – Ilustração da estrutura de um pacote de transmissão LoRa. Adaptado de: (CHALACAN, 2020) . . . . .	61
Figura 13 – Esquemático de uma rede de comunicação com arquitetura LoRaWAN	62
Figura 14 – Exemplo de placa de desenvolvimento ESP32 com rádio LoRa integrado	63
Figura 15 – Exemplo de módulo individual de rádio LoRa . . . . .	64
Figura 16 – Metodologia de gerenciamento de tarefas <i>foreground/background</i> - Adaptado de (BORGES, 2011) . . . . .	66
Figura 17 – Metodologia de gerenciamento de tarefas RTOS - Adaptado de (DIGIKEY, 2021) . . . . .	67
Figura 18 – Abordagem Robin-Round de escalonamento de tarefas - Adaptado de Digi-Key (2021) . . . . .	69
Figura 19 – Abordagem Preemptiva de escalonamento de tarefas - Adaptado de )digike1 . . . . .	69
Figura 20 – Estados que uma tarefa pode assumir em um RTOS . . . . .	70

Figura 21 – Transformador de tensão PZT 100-0.1 . . . . .	74
Figura 22 – Transformador regulador . . . . .	74
Figura 23 – Capacitor de medição de 100 pF . . . . .	75
Figura 24 – Parte secundária do capacitor de medição . . . . .	75
Figura 25 – Resistor de medição de 280 M $\Omega$ . . . . .	75
Figura 26 – Resistor de 1200 $\Omega$ . . . . .	75
Figura 27 – Parte secundária do resistor de medição . . . . .	75
Figura 28 – Haste de descarga e aterramento . . . . .	76
Figura 29 – Haste de conexão . . . . .	76
Figura 30 – Encaixe de conexão . . . . .	76
Figura 31 – Unidade de controle . . . . .	77
Figura 32 – Osciloscópio . . . . .	77
Figura 33 – Esquemático de conexão dos transformadores na configuração de cascata - Adaptado de Ahl e Rehm (2018) . . . . .	78
Figura 34 – Conexão em paralelo dos enrolamentos primários dos transformadores - Fonte: Ahl e Rehm (2018) . . . . .	78
Figura 35 – Conexões do enrolamento de baixa tensão do transformador 1 - Fonte: Ahl e Rehm (2018) . . . . .	79
Figura 36 – Detalhe da conexão entre os transformadores - Fonte: Ahl e Rehm (2018)	80
Figura 37 – Circuito final do ensaio CA com dois transformadores conectados em cascata . . . . .	80
Figura 38 – Esquemático elétrico do circuito final do ensaio CA . . . . .	81
Figura 39 – Circuito CA utilizado para calibração . . . . .	82
Figura 40 – Relação entre a tensão de entrada e a tensão $V_{divV}$ do divisor de tensão capacitivo . . . . .	82
Figura 41 – Relação entre a corrente de entrada e a corrente $I_a$ do divisor de tensão resistivo com tensão $V_{divR}$ . . . . .	83
Figura 42 – Isolador nº 24 da cadeia de isoladores contaminado naturalmente – Parte superior . . . . .	84
Figura 43 – Isolador nº 24 da cadeia de isoladores contaminado naturalmente – Parte inferior . . . . .	84
Figura 44 – Relação entre a resistência e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e secos . . . . .	86
Figura 45 – Relação entre a reatância e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e secos . . . . .	86
Figura 46 – Circuito elétrico equivalente do divisor de tensão resistivo . . . . .	87
Figura 47 – Borrifador utilizado no experimento e superfície do isolador 24 umidificada	87
Figura 48 – Relação entre a resistência e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e úmidos . . . . .	88

Figura 49 – Relação entre a reatância e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e úmidos . . . . .	89
Figura 50 – Esquema de medição das formas de onda de tensão e corrente no sistema de aferição . . . . .	90
Figura 51 – Esquemático considerado para o cálculo da tensão do isolador. . . . .	92
Figura 52 – Circuito elétrico equivalente representando a impedância obtida do isolador em série com o divisor de tensão resistivo . . . . .	94
Figura 53 – Comparação entre os valores de resistência do circuito para os isoladores em diferentes condições . . . . .	95
Figura 54 – Comparação entre os valores de reatância do circuito para os isoladores em diferentes condições . . . . .	97
Figura 55 – Comparação da condutância dos isoladores em condições com e sem umidade. . . . .	97
Figura 56 – Quantidade média de descargas parciais para os isoladores em condições com e sem umidade artificial. . . . .	100
Figura 57 – Taxa de variação da quantidade de corrente de fuga para cada isolador	100
Figura 58 – Taxa de variação da quantidade de DP para cada isolador . . . . .	101
Figura 59 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores limpos e secos . . . . .	101
Figura 60 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores limpos e úmidos . . . . .	102
Figura 61 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores sujos e secos . . . . .	102
Figura 62 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores sujos e úmidos . . . . .	103
Figura 63 – Esquemático dos módulos de transmissão e recepção de dados propostos	105
Figura 64 – Modelo de <i>desktop</i> utilizado . . . . .	107
Figura 65 – Esquemático do armazenamento de dados no banco MariaDB . . . . .	107
Figura 66 – Software utilizado para conexão serial com o microcontrolador e armazenamento de dados no banco MariaDB . . . . .	108
Figura 67 – Foto do sensor BME680 . . . . .	109
Figura 68 – Esquema de funcionamento do sensor BME680 . . . . .	110
Figura 69 – Esquema de conexão entre diferentes dispositivos escravos e um dispositivo mestre - Comunicação I2C . . . . .	113
Figura 70 – Esquema de conexão entre diferentes dispositivos escravos e um dispositivo mestre - Comunicação I2C . . . . .	114
Figura 71 – Fluxograma do código desenvolvido para leitura das grandezas ambientais	115
Figura 72 – Sensor DSM501A . . . . .	115
Figura 73 – Esquema de funcionamento do sensor DSM501A . . . . .	117

Figura 74 – Detecção das partículas de poeira e sua representação nas saídas do sensor. . . . .	117
Figura 75 – Sinal PWM fornecido na saída do sensor . . . . .	118
Figura 76 – Relação entre o raio calculado e a concentração de partículas – Fornecido pelo fabricante. . . . .	118
Figura 77 – Esquema de conexão entre o sensor DSM501a e o ESP32 . . . . .	119
Figura 78 – Ilustração do esquema de medição da corrente de fuga das cadeias de isoladores . . . . .	119
Figura 79 – Detalhe do anel de cordoalha para medição da corrente de fuga . . . . .	120
Figura 80 – Detalhe do cabo de derivação para a medição da corrente de fuga . . . . .	121
Figura 81 – Elemento transmissor de corrente de fuga AC . . . . .	121
Figura 82 – Montagem experimental para a utilização do sensor de corrente de fuga. 122	
Figura 83 – Relação entre a corrente de entrada e a tensão de saída do sensor de corrente de fuga . . . . .	123
Figura 84 – Aparato experimental para a construção da curva do sensor de corrente. (a) Medição da saída do sensor de corrente utilizando um multímetro; (b) Detalhe da passagem do cabo de corrente no interior do sensor; (c) Simulador de sistema de energia F615 utilizado para fornecer as correntes AC lidas pelo sensor. . . . .	123
Figura 85 – Ilustração dos conceitos de amostragem e quantização no processo de conversão de um sinal analógico para digital - Fonte: (GONZALEZ; WOODS, 2018) . . . . .	124
Figura 86 – Conversor analógico-digital ADS115 . . . . .	124
Figura 87 – Esquemático da estrutura interna do dispositivo ADS1115 - Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009) . . . . .	125
Figura 88 – Esquemático das conexões do dispositivo ADS1115 - Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009) . . . . .	126
Figura 89 – Lógica de conversão entre sinais analógicos de entrada e sinais digitais de saída do conversor AD - Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009) . . . . .	128
Figura 90 – Fluxograma da implementação da leitura do conversor AD . . . . .	128
Figura 91 – Fluxograma da implementação do cálculo do valor RMS da corrente de fuga . . . . .	129
Figura 92 – Montagem da fonte chaveada utilizada . . . . .	130
Figura 93 – Esquemático do circuito oscilador externo do ESP32 - Fonte: (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021) . . . . .	131
Figura 94 – Caixa de acondicionamento utilizada para a montagem do circuito . . . . .	131
Figura 95 – Fluxograma de funcionamento do software do módulo de transmissão do monitor de isolamento . . . . .	133



Figura 96 – Fluxograma de funcionamento do software do módulo de transmissão do monitor de isolamento . . . . .	134
Figura 97 – Protótipo do módulo transmissor do monitor de condição de isolamento proposto . . . . .	135
Figura 98 – Protótipo do módulo receptor do monitor de condição de isolamento proposto . . . . .	136
Figura 99 – Instalação do módulo de transmissão do monitor. (a) Processo de instalação; (b) Detalhe do equipamento ao qual foi instalado o monitor	137
Figura 100 – Dados obtidos para a medição de temperatura na subestação A . . . . .	137
Figura 101 – Dados obtidos para a medição de umidade na subestação A . . . . .	138
Figura 102 – Comportamento médio da corrente de fuga. (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C. . . . .	138
Figura 103 – Níveis de descargas parciais obtidos para medições na subestação A . . . . .	139
Figura 104 – Níveis de descargas parciais obtidos para medições na subestação A . . . . .	139
Figura 105 – Circuito experimental de alta tensão para medição da corrente de fuga do isolador . . . . .	140
Figura 106 – Detalhe da conexão do sensor de corrente para medição da corrente de fuga do isolador . . . . .	141
Figura 107 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco . . . . .	142
Figura 108 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco . . . . .	142
Figura 109 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco . . . . .	143
Figura 110 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco . . . . .	143
Figura 111 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco para os diferentes níveis de tensão . . . . .	144
Figura 112 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido . . . . .	144
Figura 113 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido . . . . .	145
Figura 114 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido . . . . .	145
Figura 115 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido . . . . .	146
Figura 116 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido para os diferentes níveis de tensão . . . . .	146
Figura 117 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco . . . . .	147
Figura 118 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco . . . . .	147
Figura 119 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco . . . . .	148
Figura 120 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco . . . . .	148
Figura 121 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco para os diferentes níveis de tensão . . . . .	149
Figura 122 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido . . . . .	149
Figura 123 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido . . . . .	150
Figura 124 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido . . . . .	150

Figura 125–Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido . . . . .	151
Figura 126–Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido para os diferentes níveis de tensão . . . . .	151
Figura 127–Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador seco para o ensaio de longa duração . . . . .	152
Figura 128–Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador úmido para o ensaio de longa duração . . . . .	153

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sintetização dos trabalhos avaliados na literatura. 1 - (EL-HAG et al., 2017); 2 - (Júnior et al., 2018); 3 - (Jinlei et al., 2018); 4 - (KARUNARATHNA et al., 2018) . . . . .	48
Tabela 2 – Medições para o processo de calibração . . . . .	81
Tabela 3 – Modelo do divisor resistivo . . . . .	91
Tabela 4 – Comparação entre os valores de resistência e reatância do circuito para os isoladores em diferentes condições . . . . .	96
Tabela 5 – Valores de condutância calculados para os isoladores . . . . .	98
Tabela 6 – Sumarização dos resultados da corrente de fuga do isolador sob diferentes níveis de tensão . . . . .	152



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampere
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Conversor Analógico-Digital
ADDR	Endereço do dispositivo I2C
AD	Analógico-Digital
API	Application Programming Interface
BME680	Sensor de variáveis ambientais da Bosch
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CS	Chip Select (Seleção do Chip)
CSS	Chirp Spread Spectrum
CPLD	Dispositivo lógico complexo programável
D/A	Conversor Digital-Analógico
DDNS	Densidade de Depósito Não Solúvel
DDSE	Densidade de Depósito de Sal Equivalente
DP	Descarga Parcial
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
ESP32	Microcontrolador
FSK	Frequency Shift Keying
FPGA	Field Programmable Gate Array
GND	Terra (Ground)
GHz	Gigahertz
GPOS	General Purpose Operating Systems
GPIO	Entrada/Saída de Propósito Geral

Hz	Hertz
I2C	Inter-Integrated Circuit
IIR	Filtro de Resposta ao Impulso Infinita
IQA	Índice de Qualidade do Ar
IEC	International Electrotechnical Commission
ISM	Industrial Scientific and Medical
Kbps	Quilobits por segundo
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LED	Light Emitting Diode
LoRa	Long Range
MHz	Megahertz
Mbps	Megabits por segundo
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
OS	Sistema Operacional
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Memória de Acesso Aleatório
RTOS	Real Time Operating Systems
ROM	Memória Somente de Leitura
RMS	Root Mean Square (Valor Eficaz)
RTV	Room Temperature Vulcanizing
SDA	Linha de Dados Serial (Serial Data Line)
SDO	Saída de Dados Serial (Serial Data Out)
SE	Sistema Embarcado
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SF	Spreading Factor

SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SCL	Linha de Clock Serial (Serial Clock Line)
TS	Technical Specification
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
USP	Universidade de São Paulo
V	Volt
VCC	Tensão de alimentação
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
Vout	Saída de Tensão
Vrms	Tensão eficaz (Root Mean Square)





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos da tese de doutorado</b>	<b>29</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização da Tese de Doutorado</b>	<b>30</b>
<b>1.3</b>	<b>Trabalhos publicados</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>ISOLADORES DE ALTA TENSÃO</b>	<b>35</b>
<b>2.1</b>	<b>Operação em ambientes poluídos</b>	<b>37</b>
2.1.1	Fenômeno de <i>flashover</i>	37
2.1.2	Projeto de isoladores em linhas de transmissão	40
2.1.3	Tipos de poluição e grau de severidade de poluição	42
2.1.4	Deposição de contaminantes em isoladores	44
<b>2.2</b>	<b>Análise da condição de operação de isoladores de alta tensão</b>	<b>45</b>
<b>2.3</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>PROJETO DE SISTEMAS EMBARCADOS</b>	<b>51</b>
<b>3.1</b>	<b>Desenvolvimento do sistema embarcado</b>	<b>51</b>
<b>3.2</b>	<b>Componentes do Sistema Embarcado</b>	<b>53</b>
3.2.1	Processador do Sistema Embarcado	53
3.2.1.1	Memórias em microcontroladores	55
3.2.2	Circuitos complementares	56
3.2.3	Protocolos de comunicação em SEs	57
3.2.3.1	Tecnologia LoRa	58
3.2.4	Periféricos em SE - Sensores e atuadores	64
<b>3.3</b>	<b>Métodos de gerenciamento de tarefas em sistemas embarcados</b>	<b>65</b>
3.3.1	Conceito de tarefas em RTOS	68
3.3.2	Aplicações e vantagens do uso de RTOS	70
<b>3.4</b>	<b>Conclusões do capítulo</b>	<b>71</b>
<b>4</b>	<b>ENSAIOS ELÉTRICOS COM OS ISOLADORES NO LABORATÓ- RIO DE ALTA TENSÃO</b>	<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>Arranjo experimental</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio com os isoladores contaminados</b>	<b>82</b>
4.2.1	Isoladores contaminados naturalmente e secos	83
4.2.2	Isoladores contaminados naturalmente e com umidade artificial	85
<b>4.3</b>	<b>Ensaio com os isoladores limpos</b>	<b>88</b>
<b>4.4</b>	<b>Obtenção dos resultados dos ensaios elétricos com os isoladores</b>	<b>89</b>

4.4.1	Obtenção dos resultados . . . . .	89
4.4.1.1	Cálculo da tensão nos isoladores . . . . .	91
4.4.1.2	Quantidade de descargas parciais . . . . .	92
<b>4.5</b>	<b>Análise dos resultados dos ensaios elétricos com os isoladores . . . . .</b>	<b>93</b>
4.5.1	Resultados dos ensaios com isoladores contaminados naturalmente . . . . .	93
4.5.1.1	Resultados dos ensaios com isoladores contaminados naturalmente e com umidade artificial . . . . .	93
4.5.2	Resultados sobre os dados de corrente de fuga . . . . .	94
4.5.3	Resultados sobre os dados de quantidade de descargas parciais . . . . .	95
<b>4.6</b>	<b>Análise dos resultados dos ensaios elétricos . . . . .</b>	<b>95</b>
4.6.1	Impedância dos isoladores . . . . .	95
4.6.2	Análise da condutância dos isoladores . . . . .	96
4.6.3	Análise da corrente de fuga dos isoladores . . . . .	98
4.6.4	Análise da quantidade de descargas parciais nos isoladores . . . . .	99
4.6.5	Análise da variação da corrente de fuga e da quantidade de descargas parciais nos isoladores . . . . .	99
4.6.6	Comparação dos resultados com os isoladores limpos . . . . .	100
<b>4.7</b>	<b>Conclusões do capítulo . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>FILOSOFIA DO MONITOR DE CONDIÇÃO DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>5.1</b>	<b>Desenvolvimento do sistema embarcado . . . . .</b>	<b>105</b>
<b>5.2</b>	<b>Sistema de processamento e armazenamento de dados . . . . .</b>	<b>106</b>
5.2.1	Microcontrolador - ESP32 . . . . .	106
5.2.2	Concentrador do sistema de monitoramento . . . . .	107
<b>5.3</b>	<b>Esquemático elétrico do monitor de condição de isolamento . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>5.4</b>	<b>Monitoramento de variáveis ambientais . . . . .</b>	<b>109</b>
5.4.1	Sensor de variáveis ambientais - BME680 (Gás, pressão, temperatura e umidade) . . . . .	109
5.4.1.1	Funcionamento do BME680 . . . . .	109
5.4.1.2	Medição do sensor de gases VOCs . . . . .	111
5.4.1.3	Protocolo de comunicação . . . . .	112
5.4.1.4	Implementação do sensor BME680 . . . . .	114
5.4.2	Sensor de partículas - DSM501A . . . . .	115
5.4.2.1	Funcionamento do DSM501a . . . . .	116
5.4.2.2	Implementação do sensor DSM501a . . . . .	119
<b>5.5</b>	<b>Monitoramento de grandezas elétricas . . . . .</b>	<b>119</b>
5.5.1	Medição da corrente de fuga . . . . .	119
5.5.2	Sensor de corrente . . . . .	120
5.5.3	Conversor analógico digital . . . . .	123

5.5.4	Implementação do conversor AD . . . . .	127
<b>5.6</b>	<b>Circuitos complementares . . . . .</b>	<b>130</b>
5.6.1	Caixa de acondicionamento . . . . .	131
<b>5.7</b>	<b>Implementação do software . . . . .</b>	<b>132</b>
5.7.1	Software do módulo transmissor . . . . .	132
5.7.2	Software do módulo receptor . . . . .	133
<b>5.8</b>	<b>Conclusões do capítulo . . . . .</b>	<b>133</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>135</b>
<b>6.1</b>	<b>Implementação e instalação do sistema de monitoramento . . . . .</b>	<b>135</b>
<b>6.2</b>	<b>Medições obtidas a partir do monitoramento das subestações . . . . .</b>	<b>136</b>
<b>6.3</b>	<b>Avaliação experimental do sensor de corrente de fuga . . . . .</b>	<b>140</b>
6.3.0.1	Resultados para os isoladores sujos e secos . . . . .	141
6.3.0.2	Resultados para os isoladores sujos e úmidos . . . . .	142
6.3.0.3	Resultados para os isoladores limpos e secos . . . . .	145
6.3.0.4	Resultados para os isoladores limpos e úmidos . . . . .	146
6.3.0.5	Comparação dos resultados experimentais . . . . .	149
6.3.0.6	Resultados para os ensaios de longa duração . . . . .	149
<b>6.4</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>153</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusões do capítulo . . . . .</b>	<b>154</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>155</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>157</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>163</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS ISOLADO- RES SUJOS E SECOS . . . . .</b>	<b>165</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS ISOLADO- RES SUJOS E ÚMIDOS . . . . .</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS PARA AS CORREN- TES DE FUGA DOS ISOLADORES CONTAMI- NADOS . . . . .</b>	<b>169</b>
	<b>APÊNDICE D – RESULTADOS DA QUANTIDADE DE DESCAR- GAS PARCIAIS OBTIDAS PARA OS ISOLADO- RES CONTAMINADOS . . . . .</b>	<b>171</b>

**APÊNDICE E – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DO MONITOR DE  
CONDIÇÃO DE ISOLAÇÃO . . . . . 173**

## 1 INTRODUÇÃO

Os isoladores de alta tensão presentes nas linhas de transmissão (LTs) consistem em um dos principais elementos responsáveis por garantir a segurança da linha e de sua operação. Estes equipamentos são responsáveis por fornecer suporte mecânico aos cabos alimentadores da LT e isolamento elétrico entre tais cabos e a estrutura. Desta forma, durante sua operação, os isoladores são sujeitos a estresses provenientes de cargas mecânicas e elétricas, além de operarem expostos a ambientes com variáveis ambientais diversas, como partículas de poluição provenientes de incêndios em LTs, por exemplo, que são comuns no território brasileiro e que trazem muitos danos ao sistema elétrico (EL-HAG, 2021a; da Costa et al., 2022). Apesar de sua importância, de acordo com Sanyal et al. (2020), dentre os custos de construção de uma linha de transmissão, apenas 5% são relativos aos isoladores. No entanto, falhas nestes equipamentos são responsáveis por 70% das interrupções que ocorrem no fornecimento de energia e por até 50% dos custos relativos à manutenção.

Assim, como outros equipamentos essenciais para o funcionamento de linhas de transmissão, tais como transformadores, geradores e cabos alimentadores, defeitos no funcionamento de isoladores de linhas de transmissão podem acarretar em custosas falhas de operação da linha. Desta forma, monitorar estes ativos é de vital importância para garantir, quando necessário, a tomada de ações preventivas. Todavia, o monitoramento das condições de operação de elementos espalhados ao longo da linha de transmissão, tais como os isoladores é mais custoso e difícil do que o monitoramento para ativos que operam de forma centralizada, como transformadores, por exemplo. Além disso, avaliar a condição de isoladores de potência pode ser uma atividade que envolve riscos, necessitando de uma equipe capacitada (EL-HAG, 2021a).

Por estes motivos, é essencial desenvolver técnicas para assegurar o monitoramento das condições de funcionamento de isoladores de alta tensão. Com tais técnicas, é possível garantir a substituição otimizada dos equipamentos quando estes apresentam defeitos de funcionamento ou atingem o fim de sua vida útil. Segundo Sanyal et al. (2020), a vida útil de um isolador é de aproximadamente 30 anos e próximo deste prazo, estes equipamentos podem apresentar defeitos, sendo vital ter informações sobre seu funcionamento, pois não é possível financeiramente substituir todos os isoladores de uma linha de apenas uma vez.

Além disso, condições ambientais adversas tais como a presença de certos tipos de poluentes podem acelerar o envelhecimento dos isoladores causando sua deterioração e conseqüentemente sua falha precoce. O acúmulo de poluentes na superfície do isolador, combinado com a umidade do ar, pode levar ao surgimento de correntes de fuga na superfície do equipamento. A existência de correntes de fuga acarretam na polarização e

na ocorrência de efeitos térmicos, que promovem o envelhecimento acelerado do material que constitui o isolador. Esta situação degrada o funcionamento do equipamento e favorece a ocorrência de *flashovers* causados por poluição (JIANG et al., 2020).

A performance dos isoladores depende principalmente da condutividade da camada de poluentes em sua superfície, que é afetada pelas condições climáticas do local de instalação. Ademais, de acordo com Jiang et al. (2020), a deposição de partículas de poluição nestes equipamentos difere da deposição de partículas em outros ativos das LTs, pois no caso dos isoladores, além da força da gravidade, o campo elétrico presente ao seu redor atrai as partículas de poluição, facilitando seu movimento em direção à superfície do equipamento, ou seja, o campo elétrico ao redor do isolador causa a atração de partículas ionizadas para a sua superfície.

A adesão das partículas à superfície dos isoladores é afetada por diversos fatores, tais como: umidade relativa, velocidade do vento, força do campo elétrico. Além disso, o material que compõe o isolador também influencia no processo de deposição, isoladores com camada de silicone, por exemplo, podem apresentar acúmulo de carga, o que afeta a força do campo elétrico durante a deposição de partículas (JIANG et al., 2020). Devido à importância do tema, diversos estudos buscam modelar o processo de deposição de contaminantes em isoladores.

Os isoladores são um dos únicos equipamentos que operam durante toda sua vida útil de forma exposta, sob situações de poluição ambiental, e sob a influência de um campo elétrico significativo. Por este motivo, observa-se a necessidade de monitorar continuamente sua condição para assegurar um funcionamento adequado e garantir ações de manutenção, quando necessárias. Além disso, para que o processo de manutenção das linhas de transmissão seja eficiente, a limpeza dos isoladores poluídos deve ser feita apenas quando o acúmulo de poluição atinge níveis severos, o que pode ser acompanhado através do monitoramento dos picos de corrente de fuga dos isoladores (GOUDA; DEIN, 2014).

Métodos tradicionais para avaliar a condição de isoladores consistem em análises visuais realizadas por equipes que devem se deslocar até o local de instalação dos isoladores. Todavia, este tipo de inspeção permite apenas a identificação de defeitos visíveis externamente, não garantindo a observação adequada do funcionamento da cadeia de isoladores (SANYAL et al., 2020). Avaliações mais detalhadas exigem abordagens invasivas, que requerem a interrupção do fornecimento de energia. Tais alternativas não são adequadas por acarretarem em custos financeiros proibitivos para as empresas de energia. Para contornar estes problemas, métodos de monitoramento remoto das condições de operação dos isoladores permitem às empresas otimizar seu processo de manutenção, reduzindo os custos associados.

Desta forma, diversos estudos utilizando técnicas de aprendizado de máquinas e dados colhidos remotamente foram desenvolvidos a fim de elaborar métodos para o

---

monitoramento remoto dos isoladores. Exemplos destes estudos podem ser encontrados em [Thanh, Cho e Da \(2021\)](#), [Gouda e Khalifa \(2017\)](#), [Khafaf e El-Hag \(2018\)](#), [Santos e Bobi \(2020\)](#), [Polisetty, El-Hag e Jayram \(2019\)](#). Tais estudos se baseiam na análise de variáveis associadas com o processo de degradação dos isoladores - antes da ocorrência de uma ruptura dielétrica do isolamento, ou seja, da ocorrência de um *flashover*, diversos eventos elétricos podem ser observados nos isoladores, tais como aumento nos níveis de corrente de fuga e a ocorrência acentuada de descargas parciais que geram emissões eletromagnéticas e sonoras. Além disso, variáveis ambientais como temperatura, umidade e quantidade de partículas suspensas também têm relação com a degradação e podem fornecer informações e ser utilizadas para inferir sobre a situação dos isoladores. Ressalta-se que a premissa de monitorar remotamente um ativo do sistema elétrico e otimizar seu funcionamento por meio da análise dos dados coletados está alinhada com as diretrizes de digitalização do sistema, que, por sua vez, são congruentes com as medidas globais para alcançar o net zero. Dessa forma, verifica-se que a evolução das técnicas de monitoramento remoto de ativos distribuídos no sistema elétrico é essencial para impulsionar o sistema a atingir os níveis de digitalização necessários para essa nova era.

## 1.1 Objetivos da tese de doutorado

Esta tese de doutorado visa desenvolver um sistema de monitoramento da condição do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão operando em ambientes sujeitos a poluição, com foco em isoladores de alta tensão. Assim, o objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um dispositivo de sensoriamento capaz de aferir diferentes grandezas ambientais e elétricas a fim de monitorar os níveis de poluição e as características elétricas de isoladores e outros equipamentos de alta tensão que operam em ambientes poluídos.

A validação do equipamento desenvolvido foi realizada por meio da instalação de protótipos do monitor em subestações de alta tensão para que o monitoramento dos isoladores fosse realizado com tais equipamentos em seu ambiente de operação usual.

A inovação desta tese consiste na avaliação de diferentes abordagens de sensoriamento com o propósito de fornecer uma alternativa de monitoramento completa do sistema de isolamento de um equipamento de alta tensão. Não há relatos na literatura de um dispositivo desta natureza e complexidade. A adequação experimental para medição de corrente de fuga ou a agregação de medições relativas ao grau de poluição dos isoladores, por exemplo, permitem a análise do funcionamento e nível de degradação de tais equipamentos, facilitando assim a tomada de decisão sobre operações de manutenção e limpeza destes isoladores. Ressalta-se que, devido a natureza inovadora do dispositivo desenvolvido, será realizado um pedido de patente sobre o produto deste projeto.

Ademais, as contribuições do trabalho foram reforçadas pela realização de experimentos laboratoriais com isoladores naturalmente poluídos retirados de operação de

uma linha de alta tensão. A partir dos experimentos, foi possível observar que a presença de umidade em isoladores previamente submetidos a uma camada de poluição em sua superfície acarreta na degradação na performance destes equipamentos, mesmo após limpos. Desta forma, observa-se a necessidade de otimizar o processo de limpeza dos isoladores a fim de evitar níveis de degradação excessivos.

Desta forma, os principais produtos desta tese são sumarizados a seguir:

- Desenvolvimento de um dispositivo monitor da condição do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão. Tal dispositivo é composto por diferentes elementos sensores, capazes de fornecer informações detalhadas sobre o estado de funcionamento de isoladores de alta tensão.
- Apresentação dos desenvolvimentos experimentais dos ensaios de alta tensão utilizando isoladores retirados de operação para apresentar evidências da degradação do sistema de isolamento dos equipamentos operando sobre condições poluídas.

Em relação ao estado da arte, esta tese contribui ao desenvolver um equipamento de monitoramento da condição de isoladores, capaz de ser utilizado tanto em procedimentos laboratoriais quanto em campo, permitindo a obtenção de medições e informações desses equipamentos em ambos os ambientes. Isso promove a construção de conjuntos de dados robustos, que podem ser utilizados em trabalhos futuros. As metodologias empregadas durante os inúmeros testes experimentais e validações em campo realizados para o monitoramento também podem servir de apoio para profissionais da área em estudos de expansão energética e no planejamento de processos de operação e manutenção (O&M).

## **1.2 Organização da Tese de Doutorado**

A presente tese de doutorado está dividida em sete capítulos, considerando o presente capítulo de introdução. O [Capítulo 2](#) apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas chave do trabalho, sendo estes: operação e funcionamento de isoladores de alta tensão; mecanismos de deposição de contaminantes em isoladores; variáveis ambientais e suas influências na distribuição de poluição; revisão de literatura sobre monitoramento de equipamentos de alta tensão operando em ambientes poluídos.

Uma revisão teórica também é apresentada no [Capítulo 3](#), onde os principais aspectos relacionados com o desenvolvimento de projetos de sensoriamento baseados em sistemas embarcados são avaliados. Este capítulo foi construído tendo em vista que o produto resultante desta tese consiste em um sistema de monitoramento composto por um sistema computacional embarcado desenvolvido para realizar o monitoramento da condição de operação dos isoladores.



O [Capítulo 4](#) detalha os procedimentos experimentais realizados no laboratório de alta tensão com os isoladores poluídos que foram retirados de operação da LT. Discussões e conclusões sobre os dados obtidos em tais ensaios são apresentados neste mesmo capítulo.

Em seguida, o [Capítulo 5](#) detalha os passos que foram realizados para o desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto. Neste capítulo, os elementos sensores avaliados para compor o sistema são apresentados e seu funcionamento é detalhado. Além disso, o funcionamento do software embarcado desenvolvido é descrito através de fluxogramas ilustrativos.

O [Capítulo 6](#) apresenta os resultados obtidos considerando os dados coletados do sistema de monitoramento construído. São apresentados dados obtidos tanto em laboratório, quanto em campo. Análises comparativas com os resultados apresentados no [Capítulo 4](#) também são destacadas. Além disso, são exemplificados temas de pesquisa que podem ser desenvolvidos a partir deste conjunto de dados. Por fim, o [Capítulo 7](#) destaca as conclusões da tese de doutorado, salientando os resultados coletados nos ensaios laboratoriais e os dados coletados dos monitores instalados, além de delinear trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir dos resultados aqui obtidos.

### 1.3 Trabalhos publicados

Durante o doutorado, até o presente momento, três artigos em periódicos, treze artigos em congresso e um capítulo de livro foram publicados. A relação destes trabalhos é apresentada a seguir, com separação dos documentos relacionados com o tema de pesquisa da tese de doutorado.

Trabalhos relacionados com o tema de pesquisa do doutorado:

- SILVA, I. N.; TAVARES, B. L.; LOPES, S. M. A.; SPATTI, D. H. ; FLAUZINO, R. A.; YOSHIZUMI, V. H.; BARQUETE, A. C. C.. DETECÇÃO DE AVARIAS EM ISOLADORES DE POTÊNCIA: UMA PESQUISA DA LITERATURA CORRELATA À UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES. In: João Dallamuta; Henrique Ajuz Holzmann. (Org.). Engenharia elétrica: Sistemas de energia elétrica e telecomunicações. 1ed.: Atena Editora, 2022, v. 1, p. 41-55.;
- LOPES, S. M. A.; FLAUZINO, R. A. ; YOSHIZUMI, V. H.; SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; TAVARES, B. L.; BARQUETE, A. C. C.. Metodologia Experimental para Avaliação da Degradação do Desempenho de Isoladores Contaminados em Linhas de Transmissão. In: XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023, Brasília. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023;

- LOPES, S. M. A.; YOSHIZUMI, V. H.; TAVARES, B. L.; MOREIRA, W. H.; BARQUETE A. C. C.; FLAUZINO, R. A.; SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.. Overhead Line Insulators Performance Degradation Analysis Due to Environmental Pollution. In: XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2022, Rio de Janeiro;
- YOSHIZUMI, V. H.; LOPES, S. M. A.; TAVARES, B. L.; MOREIRA, W. H.; BARQUETE A. C. C.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A.; SILVA, I. N.. BI Interface for Power Transmission Insulators Health Monitoring. In: XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2022, Rio de Janeiro;
- SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; YOSHIZUMI, V. H., LOPES, S. M. A.; FLAUZINO, R. A.; TAVARES, B. L.; MOREIRA, W. H.; BARQUETE A. C. C.. Condition Monitoring of Power Insulators Using Intelligent Techniques – A Survey. In: IEEE ROPEC, 2022, Ixtapa, Mexico;

Trabalhos relacionados com outros temas na área de Engenharia Elétrica:

- GOMES, G. S. P.; LOPES, S. M. A.; ARAUJO, D. C. P.; FLAUZINO, R. A.; PINTO, M. M.; ALVES, M. E. G.. Wind Turbine Remaining Useful Life Prediction Using Small Dataset and Machine Learning Techniques. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40313-024-01076-y>;
- LOPES, S. M. A.; FLAUZINO, R. A.; ALTAFIM, R. A. C.. Incipient fault diagnosis in power transformers by data-driven models with over-sampled dataset. *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, v. 201, p. 107519, 2021;
- JÚNIOR, A. M.G. ; DE PAULA, H. ; BOAVENTURA, W. C.; LOPES, S. M.A.; FLAUZINO, R. A.; ALTAFIM, R. A. C.. Localisation of inter-layer partial discharges in transformer windings by logistic regression and different features extracted from current signals. *IET Science Measurement & Technology*, v. 14, p. 913-922, 2020;
- ARAUJO, D. C. P. ; GOMES, G. S. P. ; FEHLBERG, R. P.; LOPES, S. M. A.; ROSA, R. F. S.; PEREIRA, J. M. A.; FLAUZINO, R. A.; SIQUEIRA, I. P.. Identificação do Estado Operativo de Buchas Capacitivas de Alta Tensão, em Tempo Real, Através da Técnica 'Physics-Informed Machine Learning' (PIML). In: XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023, Brasília. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023;
- ARAUJO, D. C. P. ; GOMES, G. S. P. ; FEHLBERG, R. P.; LOPES, S. M. A.; NEGRAO, D. L. A.; ROSA, R. F. S.; PEREIRA, J. M. A.; FLAUZINO, R. A.;

- SIQUEIRA, I. P. . Análise Simulada dos Impactos de Transitórios Padrões e de VFTOs em Buchas Capacitivas de Alta Tensão. In: XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023, Brasília. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023;
- GOMES, G. S. P.; PEREIRA, J. M. A. ; NEGRAO, D. L. A.; LOPES, S. M. A.; ARAUJO, D. C. P.; FLAUZINO, R. A.; SIQUEIRA, I. P.; BELARMINO, V. R.; FREIRE . Utilização de técnicas de inteligência artificial e geoprocessamento para prospecção de propriedades rurais e urbanas com potencial energético de matriz renovável.. In: XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023, Brasília. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023;
  - ARAUJO, D. C. P.; GOMES, G. S. P.; FEHLBERG, R. P.; LOPES, S. M. A.; ROSA, R. F. S.; PEREIRA, J. M. A.; FLAUZINO, R. A.; FREIRE . Sistema automatizado de detecção e classificação de defeitos em linhas de transmissão de alta tensão com uso de técnicas de inteligência artificial e análise exploratória de dados. In: XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023, Brasília. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023;
  - ARAUJO, D. C. P.; GOMES, G. S. P.; LOPES, S. M. A.; PEREIRA, J. M. A.; FLAUZINO, R. A.; FEHLBERG, R. P.; ROSA, R. F. S.; SIQUEIRA, I. P.. Classificação de Resultados de Ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potência por Meio de Técnicas de IA: Estudo de Caso com Base nos Trabalhos TB-342 e TB-812 do CIGRÉ.. In: XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023, Brasília. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica SNPTEE, 2023;
  - YOSHIKUMI, V. H.; LOPES, S. M. A.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A.; SILVA, I. N.; RICCI, I. G.; LATORRE, A. G. C.. Análise de Interrupções de Áudio em Processos de Reconhecimento de Fala Para Aplicações em Sistemas Elétricos de Potência. In: XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2023), 2023, Manaus. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2023;
  - LOPES, S. M. A.; FLAUZINO, R. A.. A Novel Approach for Incipient Fault Diagnosis in Power Transformers by Artificial Neural Networks. In: 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2021, Espoo. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2021. p. 1.;
  - JÚNIOR, A. M. G.; FLAUZINO, R. A.; PAULA, H.; LOPES, S. M. A.. Eliminação Recursiva de Características (SVM-RFE) para a Localização de Descargas Parciais

em Transformadores. In: XXIII Congresso Brasileiro de Automática, 2020, Porto Alegre. XXIII Congresso Brasileiro de Automática, 2020;

- YOSHIZUMI, V. H.; LOPES, S. M. A.; FLAUZINO, R. A.; SILVA, I. N.. A Hybrid Method for Short Term Load Forecasting Using Soft Computing Techniques .In: XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2022, Rio de Janeiro;

## 2 ISOLADORES DE ALTA TENSÃO

Uma linha de transmissão possui quatro elementos principais que a constituem, são estes: os cabos condutores, os isoladores, cabos para-raios e as ferragens da estrutura. Os cabos condutores constituem o elemento que transporta energia nas linhas de transmissão. O suporte dos cabos condutores é realizado pelos isoladores, elementos que suportam esforços mecânicos e elétricos ao fornecer uma estrutura de sustentação física aos cabos condutores e isolá-los eletricamente da estrutura da LT (FUCHS, 1977).

Em relação aos esforços elétricos, espera-se que um isolador seja capaz de suportar a sobretensões que ocasionalmente podem ocorrer na linha de transmissão, como sobretensões de manobra e sobretensões de origem atmosférica, provocadas por descargas elétricas. Além de ser constituído por um material isolante, os isoladores também utilizam a capacidade de isolamento do ar que os cerca. Seu formato também é projetado para garantir a melhor distribuição dos potenciais elétricos em sua superfície. Fisicamente, por serem elementos que operam expostos a diversas condições meteorológicas, os isoladores devem ser robustos e duráveis, capazes de resistir a condições climáticas distintas e operar em ambientes com alto grau de poluição (FUCHS, 1977; CIGRE, 2000).

Existem três tipos de isoladores que são utilizados em linhas de transmissão, isoladores de pino, de pilar e de suspensão. Nesta tese, isoladores de suspensão são o foco da análise, todavia o estudo pode posteriormente ser generalizado para atender os outros tipos de isoladores. Isoladores de suspensão são muito utilizados por poderem operar em linhas de transmissão com níveis de tensão extremamente elevados. Este tipo de isolador se divide em dois tipos principais: isoladores monocorpo e isoladores de disco. O segundo tipo, isoladores de suspensão de disco, também conhecidos apenas como isoladores de suspensão, consistem no isolador cuja estrutura é apresentada na Figura 1. A Figura 2 traz um exemplo de isolador de suspensão retirado de operação de uma LT. Este tipo de isolador possui um corpo isolante e estruturas de ferro em suas extremidades que realizam a conexão de diferentes unidades, permitindo a construção de cadeias de isoladores (FUCHS, 1977).

Em relação ao material utilizado em sua composição, têm-se isoladores de cerâmica e os isoladores poliméricos ou compostos. Isoladores de cerâmica consistem em isoladores tradicionais, utilizados historicamente em linhas de transmissão. Devido ao seu histórico, já se sabe do comportamento a longo prazo deste tipo de isolador. Todavia, este tipo de isolador apresenta um peso elevado e performance degradada frente ao acúmulo de poluição em sua superfície (EL-HAG, 2021b). Para contornar tais desvantagens, isoladores poliméricos começaram a ser utilizados como alternativa, devido às suas vantagens frente aos isoladores tradicionais de cerâmica. Os isoladores poliméricos apresentam melhor performance frente à poluição em ambientes úmidos, possuindo maior resistência superficial. Além disso, são

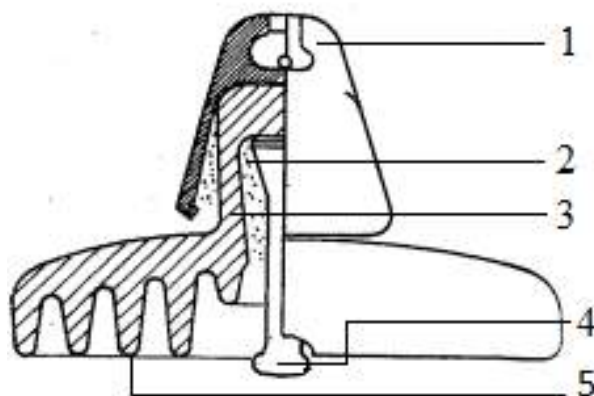


Figura 1 – Estrutura de um isolador de suspensão: 1- Campânula; 2 - Cimento; 3 - Dielétrico; 4 - Pino; 5 - Saia do isolador. Adaptado de [Fuchs \(1977\)](#)



Figura 2 – Isoladores de suspensão - (a) Vista da parte superior; (b) Vista da parte inferior

menos atrativos para ações de vandalismo e, em aspectos físicos, os isoladores poliméricos são mais leves e baratos, necessitando de menos manutenção ([KHATOON; KHAN; SINGH, 2017](#)).

Dentre as desvantagens de isoladores poliméricos frente à isoladores de cerâmicas, [El-Hag et al. \(2017\)](#) cita o envelhecimento mais acelerado, a falta de conhecimento sobre a operação à longo prazo e a dificuldade em se determinar falhas em campo. Isoladores poliméricos são constituídos de material orgânico e por isso sofrem degradação quando expostos à condições adversas, como ocorrência de corrente de fuga, variação de temperatura e umidade, poluição, entre outras ([MISHRA, 2021](#)). O envelhecimento do isolador está associado com a deterioração de seu funcionamento, levando a ocorrência de *flashover* em situações de operação normal, por exemplo. Para isoladores poliméricos, o envelhecimento está associado com a ocorrência de descargas parciais, arcos de banda seca e exposição à

radiação ultravioleta (EL-HAG et al., 2017).

## 2.1 Operação em ambientes poluídos

A operação de isoladores em ambientes com alta poluição atmosférica, principalmente em linhas de transmissão de tensões extra-elevadas, demonstrou a necessidade de explorar novos materiais e métodos de manutenção para os isoladores. Ambientes de operação extremos podem levar os isoladores a falhas internas, com perfuração do material, ou falhas externas, caracterizadas por descargas no ar localizado ao redor do isolador (FUCHS, 1977).

Quando operando em um ambiente poluído, os isoladores recebem uma camada de poluição em sua superfície. A natureza dos poluentes, as características ambientais do local de instalação e os parâmetros do isolador determinam sua performance frente à poluição. O processo de deposição de poluentes é contínuo e ocorre de forma natural, não podendo ser evitado. Nestes casos, dependendo das condições ambientais, pode haver a lavagem natural dos isoladores, através da ocorrência de chuvas periódicas. Todavia, em ambientes onde o nível de poluição é severo e o processo de lavagem natural é inexistente ou insuficiente para limpar a superfície dos isoladores, condições de umidade como chuvas leves, névoa e orvalho podem fornecer um ambiente propício para aumentar a condutividade da camada, de forma que o funcionamento do equipamento pode se deteriorar, evoluindo para a ocorrência de um *flashover*. Por este motivo, é importante que o isolador escolhido para um projeto seja capaz de aguentar situações de operações extremas, sem evoluir para uma situação de ruptura (GENÇOĞLU; CEBECI, 2008).

### 2.1.1 Fenômeno de *flashover*

O fenômeno de ruptura do isolamento de isoladores é conhecido na literatura como *flashover*. Este fenômeno “descreve a ocorrência de uma descarga elétrica não intencional sobre ou ao redor da superfície de um isolador” (KHATOON; KHAN; SINGH, 2017).

De acordo com Gençoğlu e Cebeci (2009), a ocorrência de *flashovers* em isoladores consiste em um dos maiores problemas enfrentados em linhas de transmissão, pois este acontecimento leva à suspensões no fornecimento de energia por longos períodos. Além disso, o *flashover* é um fenômeno de complexa modelagem, que depende de diversas variáveis, como o tipo e a distribuição dos poluentes e a influência que a umidade tem sobre a camada de contaminantes formada.

Este fenômeno ocorre devido a camada de contaminantes que se forma na superfície dos isoladores durante a sua operação exposta em ambientes contaminados. Quando umidificada, os íons presentes nos poluentes tornam esta camada condutiva (GENÇOĞLU; CEBECI, 2009). De acordo com Khatoon, Khan e Singh (2017) condutividade da camada de poluentes quando úmida depende de diversos fatores, tais como:

- Fatores ambientais - duração do processo de umidificação e diferença de temperatura entre o isolador e o ambiente;
- Fatores relacionados com a poluição - quantidade de sais solúveis e tipo de partículas não solúveis presentes na poluição;
- Fatores relacionados com o isolador - condição da superfície do isolador, se está íntegra ou com rachaduras, por exemplo.

Desta forma, com a camada de poluentes condutiva, ocorre o surgimento da corrente de fuga, que percorre a superfície do isolador. O caminho de passagem da corrente de fuga tem sua temperatura elevada, o que acarreta no processo de evaporação da umidade presente nestes locais de passagem, criando assim faixas ou bandas secas na superfície do isolador (GENÇOĞLU; CEBECI, 2009). Ressalta-se que há prevalência da formação de bandas secas em locais de maior densidade de corrente de fuga, usualmente nas proximidades dos pinos dos isoladores (KHATOON; KHAN; SINGH, 2017). A Figura 3 apresenta uma análise realizada por Ishii, Akbar e Kawamura (1984) que mostra o aumento de temperatura nas regiões ao redor dos pinos do isolador decorrentes da maior densidade de corrente de fuga nestas regiões.

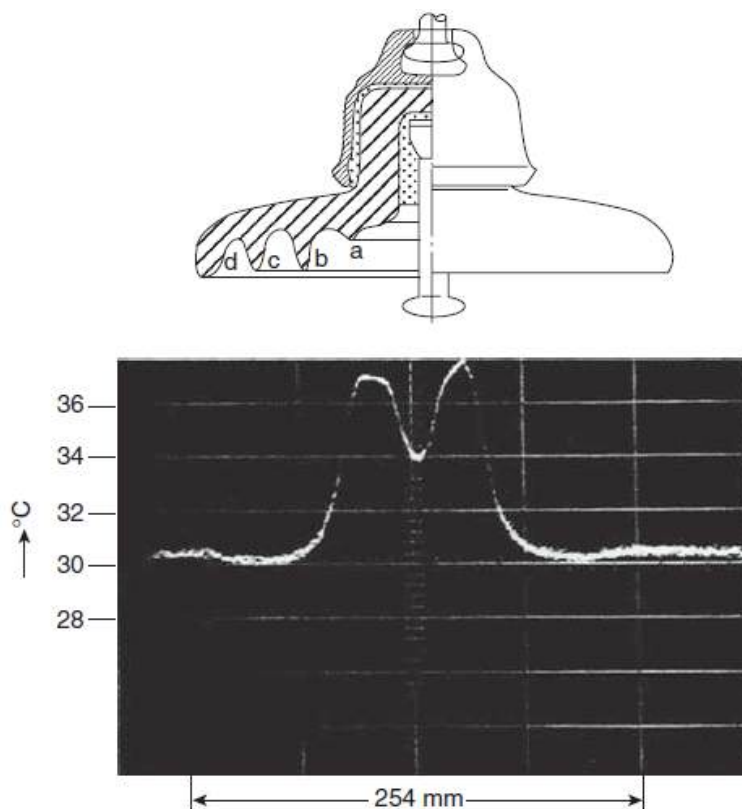


Figura 3 – Distribuição de temperatura ao longo do isolador durante o processo de passagem de corrente de fuga - Fonte: (ISHII; AKBAR; KAWAMURA, 1984)



A presença de bandas secas com alta resistividade cortando regiões condutivas (baixa resistência) da superfície do isolador limita o fluxo da corrente de fuga e altera a distribuição de tensão superficial do isolador. A diferença de potencial entre as regiões secas e úmidas do isolador produz arcos locais que cruzam as bandas secas (KHATOON; KHAN; SINGH, 2017). Um esquemático da formação de arcos entre as bandas secas e úmidas do isolador pode ser visto na Figura 4.

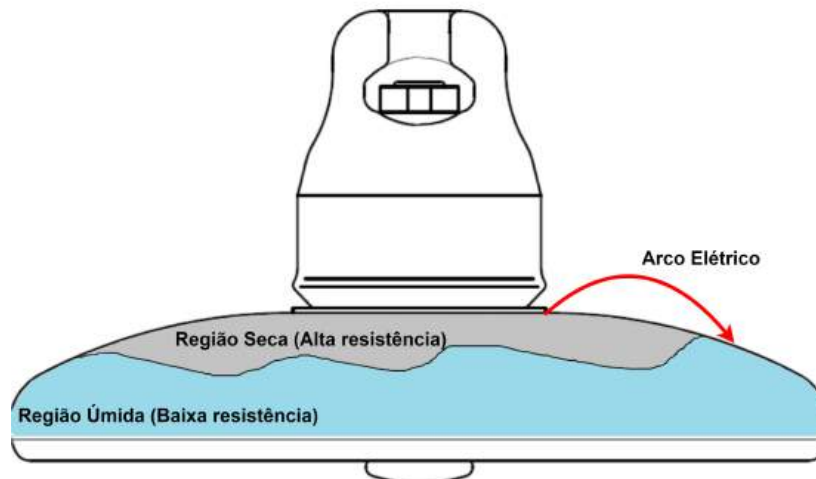


Figura 4 – Formação de bandas secas e ocorrência de descargas na superfície do isolador - Adaptado de Khatoon, Khan e Singh (2017)

A magnitude da corrente do arco é limitada devido à alta resistência da região seca. Todavia, a densidade de corrente nas extremidades do arco, que se localizam nas regiões úmidas, é elevada e acarreta na expansão da banda seca. Além disso, embora a magnitude da corrente do arco seja limitada, ainda há forte emissão acústica e ultravioleta relacionadas com o fenômeno (FARZANEH MASOUD E CHISHOLM, 2009).

A evolução ou não para a ocorrência de *flashover* depende do balanço entre o processo de umidificação e de "secagem" do isolador. Caso o processo de passagem de corrente pela superfície do isolador seja capaz de secar a superfície em sua totalidade, sem que esta seja umidificada novamente, o isolador é capaz de reestabelecer suas características elétricas de operação normal. No entanto, se a taxa de umidificação da superfície do isolador se equiparar a taxa de evaporação, devido à passagem de corrente de fuga e ocorrência de arcos, o isolador irá operar sob um estado de equilíbrio dinâmico que pode durar por horas até que haja um aumento expressivo da corrente de fuga (FARZANEH MASOUD E CHISHOLM, 2009).

O processo evolui para a ocorrência do *flashover* quando a taxa de umidificação se sobrepõe a taxa de evaporação. Nesta situação, os arcos aumentam e ocorrem novamente a cada ciclo de rede. Este processo leva ao aumento expressivo do arco que corta a totalidade da superfície do isolador, com uma corrente de falta de centenas ou milhares de amperes de magnitude. A descarga que ocorre durante o *flashover* contorna totalmente o isolador

e acarreta em uma diferença de potencial basicamente nula entre as suas extremidades (FARZANEH MASOUD E CHISHOLM, 2009).

Pesquisas desenvolvidas para investigar o fenômeno de *flashover*, visam principalmente determinar os pontos de corrente e tensão críticos nos quais ocorre a ruptura. Além disso, devido à importância do tema, as características dos isoladores frente a ocorrência de *flashover* são um dos principais fatores analisados durante o projeto do isolamento de linhas de transmissão (GENÇOĞLU; CEBECI, 2008).

Existem diversos modelos propostos para calcular a tensão de *flashover*, de forma que ainda há muitas discussões na literatura. Todavia, todos os modelos determinam que, com o aumento da condutividade superficial da camada de poluentes e, conseqüentemente, a redução da resistência superficial, a tensão de *flashover* é exponencialmente reduzida, ou seja, torna-se mais fácil a ocorrência do fenômeno (SALEM et al., 2017).

Alguns aspectos contribuem para melhorar a performance dos isoladores contra a ocorrência do *flashover*. O uso de coberturas de materiais hidrofóbicos, como o silicone, evitam a formação de um filme de água na superfície do isolador, dificultando o surgimento de corrente de fuga. Outro aspecto importante é o projeto do isolador; isoladores com maior número de saias, estruturas indicadas na Figura 1, apresentam maior tensão de *flashover*, sendo mais resistentes contra a ocorrência deste fenômeno devido à sua distância de escoamento maior. Todavia, isoladores com saias de diâmetro elevado possuem maior superfície propensa à contaminação, sendo mais suscetíveis à ocorrência de *flashovers* (KHATOON; KHAN; SINGH, 2017).

### 2.1.2 Projeto de isoladores em linhas de transmissão

A escolha do tipo de isolador para um projeto de operação em um ambiente poluído depende das características do sistema tratado e das condições ambientais do local de instalação. A norma ABNT IEC/TS 60815-1:2014 define três abordagens que podem ser utilizadas para a escolha. As três abordagens se distinguem na forma que é avaliada a severidade da poluição no ambiente de instalação e o nível de influência das condições ambientais na operação do tipo de isolador escolhido (ABNT, 2014).

A primeira abordagem é a mais completa e com maior precisão, e consiste em utilizar dados históricos sobre a operação de uma linha de transmissão, subestação ou estação de ensaios localizadas na região de instalação ou em uma região com condições ambientais semelhantes. Nesta abordagem, os isoladores são selecionados com base nos dados históricos de desempenho dos isoladores instalados. O isolador escolhido por esta abordagem, não será necessariamente o mesmo tipo de isolador do qual se analisou os dados históricos, pois os requisitos do projeto como requisitos do sistema e parâmetros do isolador podem ser distintos. Todavia, a experiência analisada será utilizada como guia para adaptar os parâmetros do isolamento e determinar a escolha do novo isolador (ABNT,

2014).

Para a segunda abordagem determinada pela norma, a escolha dos isoladores se baseia na realização de ensaios laboratoriais. Tais ensaios são baseados em documentos técnicos específicos, tais como IEC 60507 e IEC/TS 61245. Enquanto os dados utilizados para a primeira abordagem são previstos para um período de cinco a dez anos (ou de dois a cinco anos, no caso de uma estação de ensaios), para a segunda abordagem considera-se adequado a coleta de medições sobre a severidade da poluição local pelo período de um ano (ABNT, 2014).

No caso da segunda abordagem, quando não é possível medir os níveis de poluição local, deve ser feita uma estimativa deste indicador, com base na análise ambiental do local. Após a obtenção dos dados de severidade de poluição, medidos ou estimados, esta abordagem prevê a seleção de isoladores candidatos e em seguida a análise da viabilidade dos candidatos através de ensaios laboratoriais, para que seja escolhido o tipo de isolador mais adequado. Esta abordagem tem uma precisão menor do que a primeira para a escolha do isolador que será utilizado, pois seu resultado depende de diferentes aspectos e considerações ao longo do processo de seleção (ABNT, 2014).

A terceira e última abordagem, também consiste na de menor precisão, pois restringe-se apenas em medir ou estimar os dados da severidade de poluição local e utilizar tais informações para a seleção do isolador. Desta forma, tal abordagem se diferencia da segunda por não apresentar a etapa de ensaios laboratoriais para verificar o desempenho dos isoladores em um ambiente com o grau de poluição avaliado. Além disso, a precisão desta abordagem pode ser ainda menor caso não haja possibilidade de medir os níveis de poluição local, utilizando-se apenas a estimativa. Quando o projeto utiliza este tipo de abordagem dois cenários tornam-se possíveis, o subdimensionamento dos isoladores trazendo prejuízos para o desempenho do sistema, ou o sobredimensionamento, que acarreta em prejuízo financeiro. Ressaltando que, a longo prazo, o subdimensionamento também leva à prejuízos financeiros, pois devido ao mau funcionamento do sistema, pode ser verificada a maior ocorrência de desligamentos não programados, a redução da vida útil de equipamentos, a necessidade de melhorias não planejadas, entre outras ações que visam mitigar os problemas causados pelo mau dimensionamento dos isoladores (ABNT, 2014).

Além da consideração do nível de severidade da poluição local, realizada pelas abordagens citadas anteriormente, outros aspectos também considerados para a seleção do tipo de isolador para um projeto são os requisitos do sistema, as condições ambientais e os parâmetros do isolador.

Em relação aos requisitos do sistema, são considerados aspectos como o tipo de sistema, por exemplo, ou seja, se trata-se de um sistema de corrente contínua ou alternada, pois esta característica afeta o processo de deposição de poluentes e, conseqüentemente, o tipo de isolador que deve ser utilizado (ABNT, 2014). Outros requerimentos elétricos tais

como tensão máxima do sistema e parâmetros de descargas atmosféricas e sobretensões temporárias também são analisados. Além disso, também considera-se a performance necessária do isolador que é baseada nos critérios de qualidade de energia que o sistema deve seguir, frente a desligamentos, por exemplo (CIGRE, 2000).

### 2.1.3 Tipos de poluição e grau de severidade de poluição

Um aspecto relevante que influencia na escolha do tipo de isoladores para um projeto é o tipo de poluição existente no local de instalação, pois o tipo de poluição afeta o grau de severidade da poluição, que é um indicador diretamente utilizado para selecionar o tipo de isolador. Por este motivo, são definidos dois tipos de poluição com base em normas, o tipo A e o B. Enquanto o primeiro tipo consiste em uma poluição formada por poluentes sólidos e com partes não solúveis, a segunda é formada majoritariamente por componentes solúveis (ABNT, 2014).

Como explicado, o tipo de poluição A, possui partes sólidas e não solúveis, assim, as partes sólidas caracterizam a parte condutiva quando a camada de poluição é umidificada, enquanto que as partes não solúveis funcionam como uma parcela fixadora para a camada de poluição. A parcela sólida é usualmente formada por sais, e pode ser caracterizada em laboratório através da medição da densidade de depósito de sal equivalente (DDSE), a parcela não solúvel por sua vez é formada por diversos elementos, como poeira e argila, e pode ser medida em laboratório através da densidade de depósito não solúvel (DDNS). Casos de poluição do tipo A podem ser observados em áreas de deserto ou de poluição industrial, além disso, também podem ser observados em regiões litorâneas caso uma camada de sal seca se forme na superfície do equipamento. Considerando a poluição do tipo B, usualmente encontram-se exemplos em regiões litorâneas onde a névoa salina proveniente do oceano se deposita na superfície do equipamento (ABNT, 2014).

As regiões podem ser divididas de acordo com o tipo de poluição que possuem e com as características do ambiente, exemplos de regiões são: regiões desérticas, litorâneas, industriais, agrícolas, de interior. Uma região também pode conter características de mais de um tipo de ambiente, assim é importante avaliar o funcionamento do isolador para cada região de forma individual, pois o isolador adequado para uma região pode não ter uma operação viável em outra região (CIGRE, 2000; ABNT, 2014).

No caso deste estudo o foco é para regiões litorâneas, que são caracterizadas por uma poluição de névoa salina, ou seja, do tipo B. Além disso, devido ao regime de ventos neste tipo de região, também pode-se observar poluição do tipo A, devido à partículas provenientes do solo carregadas pelo vento. O tipo de limpeza natural em tais regiões depende do regime de chuvas, e pode ser efetivo, caso haja chuvas suficientes, pois usualmente a camada de poluentes é formada por sais de dissolução rápida (ABNT, 2014).

Para medir a severidade de poluição em isoladores, são utilizados os indicadores

DDSE e DDNS para poluição do tipo A e condutividade superficial para poluição do tipo B. A condutividade superficial é obtida a partir da medição da corrente de fuga na superfície do isolador (ABNT, 2014).

Para avaliar a severidade da poluição em um local, algumas técnicas podem ser utilizadas, a com maior precisão consiste em medições no local, a partir de medições de DDSE e DDNS para poluição do tipo A e medições de corrente de fuga ou condutância superficial dos isoladores para poluição do tipo B. Outros métodos de menor confiabilidade para medir a severidade da poluição local consistem em obter dados sobre a operação de isoladores no local ou em regiões próximas, a partir de simulações, ou através de uma análise qualitativa que considera a tabela 5 presente na norma ABNT IEC/TS 60815-1:2014 (ABNT, 2014). A norma ainda indica que além das medições citadas anteriormente, é importante obter informações pluviométricas ou de umidade do local de instalação, pois este aspecto afeta na performance de isoladores operando em ambientes poluídos.

De acordo com as medições obtidas, o nível de poluição em um ambiente ser classificado de acordo com seu grau de severidade entre muito leve, leve, média, pesada e muito pesada. A Figura 5 foi retirada da norma ABNT IEC/TS 60815-1:2014 e mostra a relação entre os valores medidos e a classificação da severidade da poluição (ABNT, 2014).

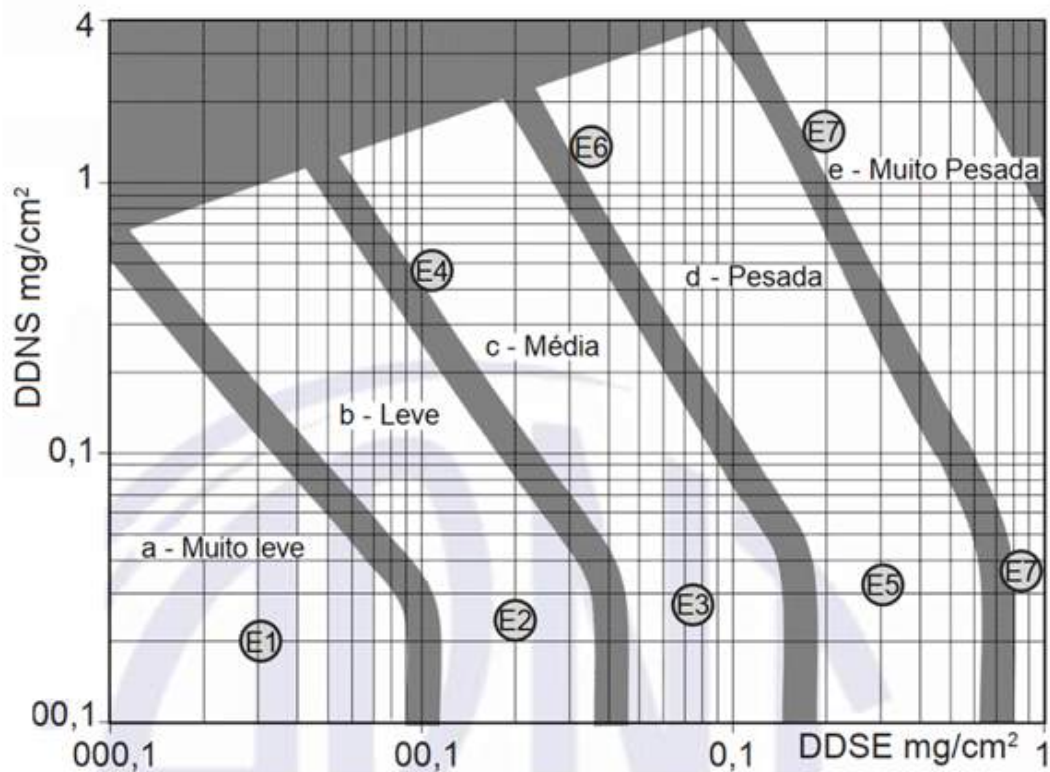


Figura 5 – Relação entre os indicadores DDSE e DDNS e a classificação da região de acordo com o grau de severidade de poluição - Fonte: (ABNT, 2014)

Dois aspectos podem ser destacadas da figura, a transição entre as classes não é discreta, por isso as regiões de transição entre duas classes estão em cor cinza. Além disso,

nota-se que uma região com o mesmo nível de DDSE pode ser classificada como poluição média ou pesada dependendo do seu nível de DDNS, isso mostra a importância de realizar a medição de ambos os índices (ABNT, 2014). As características de cada uma das sete regiões destacadas nas figuras são explicadas a seguir.

- E1 - Caracteriza uma região a mais de 50 km de distância do oceano, do deserto ou de uma região plana e árida; a mais de 10 km de fontes de poluição humana; com limpeza natural mensal e regular e cuja direção das rajadas de vento não é a mesma das fontes de poluição.
- E2 - Caracteriza uma região entre 10 e 50 km de distância do oceano, do deserto ou de uma região plana e árida; entre 5 e 10 km de fontes de poluição humana; com limpeza natural mensal e regular e cuja direção das rajadas de vento não é a mesma das fontes de poluição.
- E3 - Caracteriza uma região entre 3 e 10 km de distância do oceano, do deserto ou de uma região plana e árida; entre 1 e 5 km de fontes de poluição humana; com limpeza natural mensal e regular e cuja direção das rajadas de vento não é a mesma das fontes de poluição.
- E4 - Caracteriza uma região distante em relação às previamente descritas, com chuvas fortes de alta condutividade, alternância entre longos períodos de poluição seca e neblina densa, e um valor de DDNS de 5 a 10 vezes superior ao de DDSE.
- E5 - Caracteriza uma região a menos de 3 km de distância do oceano, do deserto ou de uma região plana e árida; a menos de 1 de fontes de poluição humana;
- E6 - Situada além da categoria E5, esta região compartilha as mesmas características ambientais descritas para a categoria E4.
- E7 - Caracteriza uma região próxima às fontes de poluição, que recebe diretamente borrifos de água do mar ou tem presença de névoa salina; que recebe diretamente partículas condutivas e sofre umidificação frequente em baixas quantidades; ou áreas de deserto que apresentam condensação frequente.

#### 2.1.4 Deposição de contaminantes em isoladores

Além de ser afetado pela ocorrência de descargas parciais, o material da superfície do isolador também sofre degradação devido ao processo de deposição de poluentes. O processo de colisão e deposição de sujidades em isoladores é dividido em quatro etapas: injeção, colisão, recuperação e ejeção. Durante a colisão, as partículas produzem uma pequena deformação na superfície do isolador, criando uma força elástica perpendicular à superfície (ZHAO et al., 2020). O estresse de compressão no ponto de contato entre a

partícula de poluição e o isolador é proporcional à velocidade da partícula que colidiu. Se o nível deste estresse superar o ponto de escoamento do material, pode haver uma deformação plástica em sua superfície. No caso de isoladores com cobertura de silicone, por exemplo, tem-se uma superfície com baixo módulo de Young, o que leva a ocorrência da deformação plástica, ou seja, de uma deformação permanente (JIANG et al., 2020).

As partículas são ejetadas da superfície do isolador de volta para o ar se sua velocidade superar a força de aderência do isolador. Um aspecto que afeta o processo de ejeção de partículas é a umidade relativa do ambiente, pois esta grandeza afeta a força de aderência do isolador, de forma que, quanto maior a umidade, maior a força de aderência. Neste caso, na presença de umidade, partículas maiores terão maior probabilidade de serem depositadas na superfície por possuírem maior energia cinética (ZHAO et al., 2020).

Por se tratar de um processo complexo, que pode afetar a estrutura superficial dos isoladores, estudos que analisam as consequências ocasionadas pelo processo de deposição de contaminantes na superfície de isoladores são necessários. Desta forma, é possível prever o perfil de envelhecimento do isolador, otimizar processos de manutenção e apoiar o desenvolvimento de projetos que visem combater o acúmulo de poluentes em isoladores.

Devido à importância do tema, diversos estudos buscam modelar o processo de deposição de contaminantes em isoladores. Em Li et al. (2020) é avaliada a influência que o local e as dimensões de danos na superfície de revestimentos de silicone (RTV - *Room Temperature Vulcanizing*) em isoladores de vidro têm sobre o desempenho de tais isoladores. Em Ullah e Akbar (2022) foi avaliada a performance de revestimentos RTV frente à altas tensões do tipo CC e à presença de correntes de fuga, descargas parciais e eventos de *flashover*. Neste estudo, os ensaios experimentais consideraram uma análise de longo prazo, submetendo os revestimentos a um estresse contínuo por 10 mil horas, a fim de avaliar o impacto em seu envelhecimento. As alterações químicas causadas na cobertura RTV devido à descargas parciais também foram avaliadas em Arshad et al. (2017), estudo no qual os experimentos laboratoriais foram realizados com pedaços retangulares dos revestimentos RTVs. Outro estudo que avalia experimentalmente a degradação da performance da cobertura RTV utilizada em isoladores, devido à ocorrência de descargas parciais, pode ser encontrado em Mehmood, Akbar e Ullah (2020).

## 2.2 Análise da condição de operação de isoladores de alta tensão

Devido à gravidade associada com a falha dos isoladores em linhas de transmissão de alta tensão, diversos estudos e linhas de pesquisa foram desenvolvidas buscando assegurar o correto funcionamento destes equipamentos. Algumas linhas de pesquisa focam na análise no material constituinte dos isoladores e no seu comportamento frente ao fenômeno de *flashover*. Todavia, a modelagem deste fenômeno ainda é complexa e muito discutida na literatura, de forma que estudos de monitoramento de condição dos isoladores

utilizando sensoriamento remoto são escolhas mais populares para otimizar os processos de manutenção e prevenir a ocorrência de *flashovers* e eventuais interrupções de fornecimento de energia.

Na literatura os estudos de monitoramento de condição focam na supervisão através de variáveis que se relacionam com o processo de *flashover*, tais como níveis de poluição (DDNS e DDSE), variáveis ambientais (temperatura, umidade, etc), níveis de corrente de fuga, emissões sonoras e visuais produzidas por descargas parciais e arcos de bandas secas, entre outros (EL-HAG, 2021b). Em El-Hag et al. (2017), os autores utilizam um sensor acústico comercial, para medir emissões acústicas provenientes da formação de arcos na superfície do isolador, e uma rede neural artificial para classificar o tipo de arco como descargas parciais ou arcos formados por bandas secas. O estudo apresenta análises interessantes, utilizando técnicas de processamento de sinais para tratar o sinal acústico antes de utilizá-lo na rede neural e demonstrando a viabilidade de utilizar sinais acústicos como indicadores confiáveis da ocorrência de arcos na superfície dos isoladores. Outro aspecto interessante ressaltado pelos autores é a possibilidade de utilizar o sinal de áudio para detectar tanto a ocorrência de descargas parciais, um fenômeno de alta frequência, quanto arcos de bandas secas, um fenômeno de baixa frequência. Todavia, o método de classificação utilizado apresenta um nível de acurácia aquém do usualmente encontrado na literatura, além disso, o sistema proposto não traz informações sobre o grau de degradação dos isoladores.

O uso de emissões ultrassônicas para detecção de efeito corona também é apresentado em Júnior et al. (2018). Neste estudo, os autores desenvolvem um circuito eletrônico específico para capturar sinais ultrassônicos na faixa dos 40 kHz emitidos por isoladores poliméricos energizados. Para fins de classificação, também são utilizadas técnicas de aprendizado de máquinas, neste caso redes neurais artificiais e máquinas de vetores de suporte. Para validar o estudo, os testes foram realizados com 6 isoladores poliméricos de linha de 69 kV em duas condições de deterioração: isoladores secos e isoladores contaminados com água salgada. Os principais pontos de destaque deste trabalho consistem na descrição dos experimentos utilizando isoladores e no desenvolvimento de um sistema de aquisição de emissões ultrassônicas, pois os autores justificam que o simples uso de equipamentos convencionais de uso comerciais levam a medições difusas e não confiáveis. Todavia, os resultados do trabalho indicam uma baixa aderência dos classificadores ao problema tratado, obtendo um índice de acertos reduzido. Além disso, o sistema proposto pelo artigo apenas identifica a ocorrência do efeito corona, não identificando o grau de contaminação do isolador e, desta forma, fornecendo poucas informações para o processo de manutenção preditiva da rede.

Em Jinlei et al. (2018), os autores desenvolvem um sistema para prever o grau de contaminação de isoladores baseado em redes neurais *backpropagation* otimizadas por



algoritmos genéticos. Para o estudo, os autores utilizam dados de uma região da China cujas principais fontes de poluição são termoeletricas, fábricas de fertilizantes, pedreiras, fábricas de cloro e álcalis e usinas de aço. Foram avaliados como possíveis dados de entrada do sistema inteligente os dados de variáveis ambientais - temperatura, velocidade do vento, nível de precipitação, umidade relativa e índice de qualidade do ar - para realizar a previsão dos indicadores de nível de poluição - DDSE e DDNS. Para selecionar quais variáveis ambientais seriam utilizadas para a previsão de cada um dos indicadores, foi utilizado o método de análise de correlação cinza. O estudo é interessante por apresentar a validade do uso de variáveis climáticas para previsão dos níveis de contaminação. Todavia, é utilizado um conjunto reduzido de dados, de forma que para aumentar a confiabilidade dos resultados, seria necessário realizar um estudo com mais amostras.

A correlação existente entre variáveis ambientais e as condições de operação dos isoladores também é analisada em [Hussain et al. \(2017\)](#). Este artigo discute os problemas de degradação de isoladores devido à diversos fatores ambientais e à uma severa contaminação salina em regiões litorâneas. Para validar suas hipóteses, os autores realizaram testes em uma câmara experimental que visou replicar as condições climáticas naturais que os isoladores são expostos em regiões litorâneas. Assim, foram utilizados geradores de ventos, sais específicos desta região e um sistema de injeção de pó de argila. Duas situações foram avaliadas, a de névoa fria e a de chuva. Os resultados indicaram que a velocidade e a direção do vento afetam a taxa de acúmulo de contaminantes nos isoladores; que o nível de corrente de fuga possui relação com a severidade da poluição e com a condição de umidade da camada de contaminantes; também foi verificado que a tensão de *flashover* decai de forma não linear com o aumento do nível de umidade na superfície do isolador. Este estudo apresenta resultados consistentes que indicam as relações existentes entre a performance dos isoladores e as condições climáticas, de forma que pode-se inferir que acompanhar as variáveis ambientais faz parte de um sistema de monitoramento robusto.

Em [Karunarathna et al. \(2018\)](#), o monitoramento da condição dos isoladores é realizado através da medição da corrente de fuga superficial destes equipamentos. Para validar os resultados, os autores realizaram testes em uma câmara experimental, simulando condições variadas de umidade e níveis de contaminação artificial. O estudo traz diversos detalhes sobre o aparato experimental construído de acordo com as normas, permitindo sua replicabilidade. Os testes foram realizados em três etapas, a primeira com os isoladores limpos e secos, a segunda com os isoladores limpos e úmidos e a terceira com os isoladores contaminados. Os autores não verificaram a situação dos isoladores contaminados e expostos à umidade, que consiste na condição com maior propensão à ocorrência de *flashovers*.

Uma combinação de atributos elétricos e ambientais é utilizada em [Ramani et al. \(2019\)](#), onde os autores utilizam dados de corrente de fuga, temperatura e umidade para realizar o monitoramento da condição de operação dos isoladores. O sistema desenvolvido

Tabela 1 – Sintetização dos trabalhos avaliados na literatura. 1 - (EL-HAG et al., 2017); 2 - (Júnior et al., 2018); 3 - (JINLEI et al., 2018); 4 - (KARUNARATHNA et al., 2018)

Autor	Variável avaliada	Grandezas de interesse	Equipamentos de aquisição	Método de análise
1	Emissões acústicas	Descargas parciais e arcos de bandas secas	Sensor acústico comercial	RNAs
2	Emissões ultrassônicas	Efeito corona	Circuito eletrônico próprio	RNAs e SVMs
3	Variáveis ambientais	Grau de contaminação de isoladores	-	RNAs otimizadas
4	Corrente de fuga superficial	Condição operativa dos isoladores	Sistema de aquisição laboratorial	-

se baseia na tecnologia de internet das coisas e os isoladores de teste utilizados para validar o estudo foram poluídos artificialmente. Outros trabalhos interessantes que apresentam revisões sobre o estado da arte de monitoramento de condição de isoladores e análise de degradação deste tipo de equipamento podem ser encontrados em Mishra (2021), El-Hag (2021b).

A Tabela 1 resume os principais pontos dos artigos discutidos nesta seção. Observa-se que há uma predominância de estudos focados na estimativa de grandezas específicas dos isoladores, em vez de seu estado operativo geral. Quando os artigos se concentram no estado operativo, normalmente apresentam métodos cuja aplicação prática em campo é limitada, sendo tradicionalmente técnicas de laboratório. Uma análise mais abrangente da literatura foi realizada pela autora desta tese no artigo publicado em Silva et al. (2022).

### 2.3 Conclusões do capítulo

Este capítulo focou em aspectos relacionados com isoladores de alta tensão e o efeito da poluição ambiental em sua operação. Inicialmente o capítulo apresentou conceitos teóricos sobre as características elétricas de isoladores e sobre sua operação em ambientes poluídos. O processo de *flashover* em isoladores poluídos foi detalhado e métodos previstos em norma para a seleção de isoladores e definição do grau de severidade de poluição local foram descritos.

Desta forma, pode-se observar que o procedimento de escolha de isoladores segue o seguinte processo, primeiro escolhe-se a abordagem que será utilizada para o projeto, com base nas informações e recursos disponíveis. Em seguida, são obtidos os dados necessários para estas abordagens, as informações sobre o sistema e sobre as condições ambientais da região, tal como o grau de severidade da poluição. Com base nas abordagens existentes para escolher o tipo de isolador, nota-se a importância de monitorar a condição do isolamento deste tipo de equipamento durante a sua operação.

Uma revisão de literatura sobre trabalhos desenvolvidos na área de monitoramento da condição de isoladores foi apresentada e pontos de contribuição para o trabalho foram

ressaltados, assim como pontos passíveis de melhorias. A principal inferência obtida a partir da análise de literatura foi verificar a viabilidade do uso de variáveis ambientais, níveis de corrente de fuga e dados de emissão acústica para identificar a condição do isolador. O sistema embarcado proposto nesta tese de doutorado se baseia na coleta de algumas dessas variáveis e funciona como uma ferramenta capaz de fornecer um rico conjunto de informações que, além de auxiliar no processo de manutenção de linhas já operativas, pode ser de grande valia para estudos de viabilidade de novas linhas, que podem utilizar os dados do sistema para escolher os isoladores com base na primeira abordagem determinada pela norma, garantindo assim maior precisão em sua escolha.



## 3 PROJETO DE SISTEMAS EMBARCADOS

### 3.1 Desenvolvimento do sistema embarcado

Conforme destacado na introdução, o objetivo desta tese é desenvolver um sistema de monitoramento para avaliar a condição de isolamento de isoladores de alta tensão. Para atingir esse objetivo, será projetado um sistema embarcado (SE) que integrará os sensores necessários para monitorar as variáveis relevantes ao desempenho dos isoladores. Assim, este capítulo visa apresentar os conceitos fundamentais de sistemas embarcados e detalhar o projeto deste tipo de sistema.

Um sistema embarcado consiste em um sistema computacional que contém um software embarcado e que na maioria das vezes é dedicado para aplicações específicas. Basicamente, um SE poderia ser descrito como uma plataforma de hardware cujo principal componente é um microprocessador ou um microcontrolador, que possui interfaces de I/O e que tem gravado em sua memória um software que define as atividades que devem ser realizadas (HAMBARDE; VARMA; JHA, 2014).

Atualmente, diferentes tipos de microcontroladores e microprocessadores estão disponíveis para o uso em SE. Para aplicações de baixo custo e complexidade, microcontroladores de 8 bits são suficientes para atender os requisitos da maioria dos projetos. Enquanto que microcontroladores de 16 bits ou mais são capazes de gerar projetos mais sofisticados.

De acordo com Ganguly (2014), um sistema embarcado é composto por três partes principais, sendo estas: os componentes de hardware; o software da aplicação - usualmente embarcado na memória ROM do sistema; um sistema operacional em tempo real (em inglês, real time operating systems, RTOS). Ressalta-se que o uso do RTOS é opcional e, quando presente, também está disponível na ROM. Quando o RTOS não é utilizado, diz-se programação *bare metal*.

O hardware de um SE é composto por componentes como *timers*, circuitos de alimentação, de reset e oscilação, entre outros, os principais dispositivos são apresentados na Figura 6. Em relação ao software, este se refere ao programa desenvolvido contendo as tarefas que se deseja executar com o sistema embarcado, como realizar a leitura de sensores, por exemplo. Por fim, o RTOS é responsável por gerenciar a execução do software embarcado.

Sistemas embarcados podem ser categorizados de acordo com sua escala, de forma que os sistemas podem ser de pequena, média e larga escala. SEs de pequena escala usualmente são desenvolvidos com microcontroladores de 8 ou 16 bits, operam com baterias e seu software normalmente é desenvolvido em linguagem C embarcado na memória do

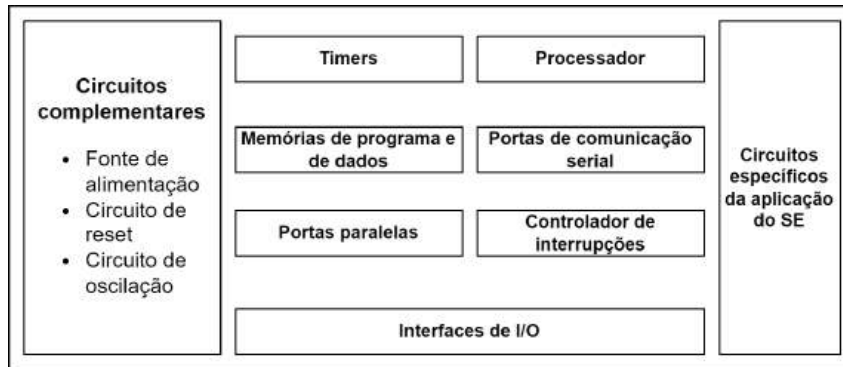


Figura 6 – Componentes que compõem a camada de hardware de um SE - Adaptado de (GANGULY, 2014)

SE. Sistemas de média escala são desenvolvidos com microcontroladores de 16 ou 32 bits, possuem hardwares e softwares mais sofisticados e podem apresentar diferentes aplicações. Usualmente, neste tipo de sistema, utilizam-se linguagens de programação orientadas a objetos, com o uso do RTOS. Por fim, sistemas embarcados de larga escala consistem em sistemas mais sofisticados, usualmente desenvolvidos com unidades lógicas reconfiguráveis, como CPLDs (do inglês, *complex programmable logic devices*) e FPGAs (do inglês, *Field Programmable Gate Array*).

Usualmente, as três maiores limitações de um sistema embarcado são relacionadas com a velocidade de processamento, a quantidade de memória disponível no sistema e o consumo energético. Cabe ao projetista do sistema verificar tais aspectos durante o desenvolvimento do projeto.

Como expresso anteriormente, o principal componente de um sistema embarcado é composto pelo processador. O dispositivo processador pode ser tanto um microprocessador quanto um microcontrolador. O dispositivo de processamento faz parte da camada de hardware do SE, enquanto que o conjunto de instruções gravado na memória do processador consiste no software do sistema embarcado (GANGULY, 2014).

O programa do SE composto por um conjunto de instruções é, em último nível, um conjunto de bits que indicam ao microcontrolador as atividades que devem ser realizadas (GANGULY, 2014). Instruções no nível de bits são chamadas de linguagem de máquina. Os elementos que compõem um SE apenas operam no nível de linguagem de máquina. Todavia, para facilitar o processo de programação, linguagens de mais alto nível foram desenvolvidas. A linguagem assembly é uma linguagem de baixo nível que possui instruções que são específicas para o hardware, ou seja, microcontroladores diferentes possuirão instruções em assembly diferentes. Linguagens de programação de alto nível foram desenvolvidas posteriormente e possuem a característica de serem independentes do hardware, estas linguagens possuem instruções mais próximas da linguagem humana, o que facilita o processo de desenvolvimento de código (NOERGAARD, 2014).

De acordo com [Noergaard \(2014\)](#) as linguagens de programação podem ser divididas em 5 gerações, definidas por:

- Linguagens de 1<sup>a</sup> geração - consistem em código de máquina, são linguagens compostas por números binários e que são dependentes do hardware instalado;
- Linguagens de 2<sup>a</sup> geração - linguagem assembly, é uma linguagem de baixo nível, mas que apresenta algumas instruções que são semelhantes a linguagem humana. Consiste em uma linguagem dependente de hardware, cujas instruções são diretamente relacionadas com a linguagem de máquina.
- Linguagens de 3<sup>a</sup> geração - linguagens procedurais, são linguagens de alto nível que se assemelham a fala humana, exemplos são linguagem C;
- Linguagens de 4<sup>a</sup> geração - linguagens não-procedurais, são linguagens de mais alto nível, usualmente orientadas a objetos, tais como C++;
- Linguagens de 5<sup>a</sup> geração - linguagens que ainda estão em desenvolvimento e que visam emular conversas humanas, através do uso de aprendizado de máquinas.

Conforme indicado anteriormente, os processadores apenas entendem linguagem de máquina, desta forma, durante o desenvolvimento do software é necessário utilizar ferramentas para realizar a tradução das linguagens, sejam estas de baixo ou alto nível para a linguagem de máquina. Este processo de tradução pode ser desmembrado em três etapas principais: preprocessamento, tradução e interpretação. O preprocessamento é realizado para organizar o código a fim de facilitar a tradução. Assim, para linguagens de baixo nível, assembly, por exemplo, a etapa de pre processamento irá realizar o tratamento de *labels* e macros para auxiliar o programa compilador. O compilador é a ferramenta utilizada para realizar a tradução entre a linguagem de baixo/alto nível e a linguagem de máquina ([NOERGAARD, 2014](#); [GANGULY, 2014](#)).

Após a compilação, obtém-se um arquivo do tipo objeto que, quando unido com os arquivos das bibliotecas necessárias para o programa, forma um arquivo do tipo executável. É o arquivo do tipo executável que é embarcado na memória do SE. A [Figura 7](#) apresenta os passos seguidos desde a criação do programa na linguagem de programação até a instalação no SE.

## 3.2 Componentes do Sistema Embarcado

### 3.2.1 Processador do Sistema Embarcado

O elemento processador do SE recebe o programa desenvolvido em uma linguagem de programação e deve desenvolver as atividades descritas pelas instruções de tal programa.

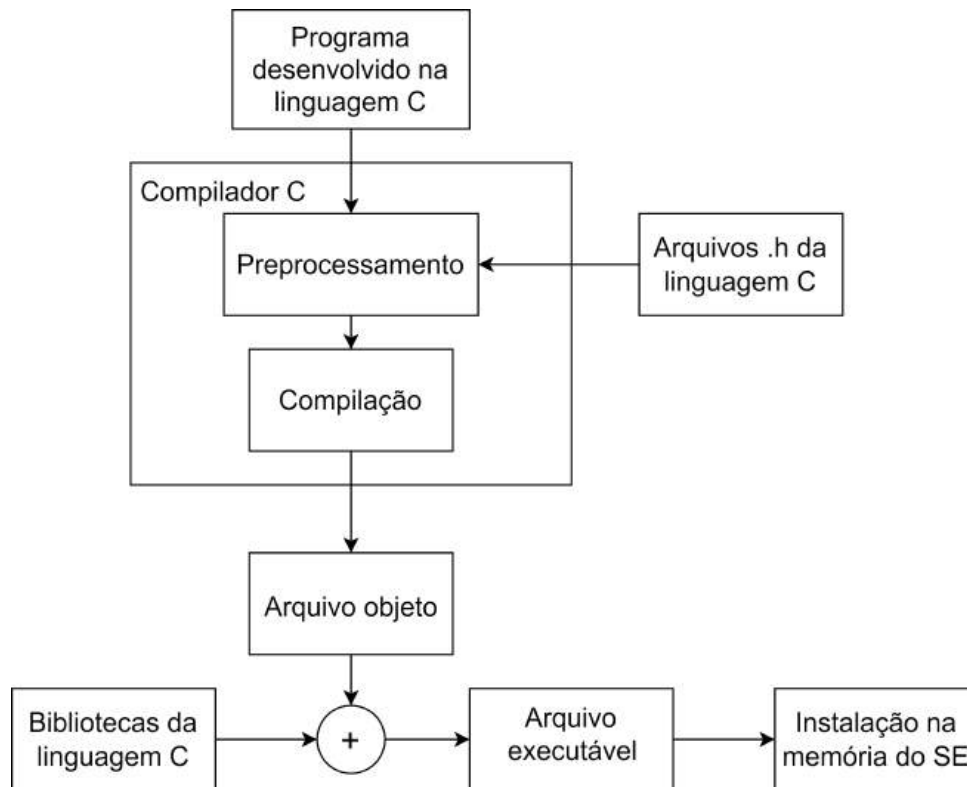


Figura 7 – Etapas para tradução do software desenvolvido até a instalação no SE - Adaptado de (NOERGAARD, 2014)

Como indicado anteriormente, este elemento pode tanto ser um microcontrolador como um microprocessador. Microprocessadores são elementos compostos por três elementos básicos - registradores, a unidade lógica aritmética (ULA) e uma unidade de controle (GANGULY, 2014).

A ULA consiste em um elemento composto por portas lógicas que realiza as operações aritméticas e lógicas requeridas ao processador pelas instruções. Os registradores por sua vez são espaços da memória que podem armazenar pedaços de informação. A quantidade de bits que um registrador pode armazenar define o tipo do microprocessador/microcontrolador. Dispositivos de 32 bits, por exemplo, possuem registradores que podem armazenar dados de 32 bits. A unidade de controle, por sua vez controla o fluxo de dados nos elementos do microprocessador com base na memória de programa (GANGULY, 2014).

A principal diferença entre microprocessadores e microcontroladores consiste no fato de que os microcontroladores integram um microprocessador com periféricos em um único chip. Desta forma, pode-se descrever um microcontrolador como um dispositivo que possui uma unidade de processamento (tal como um microprocessador), periféricos de entrada e saída, memórias, *timers*, periféricos de conversão A/D, entre outros. Desta forma, a Figura 8 representa um esquemático dos elementos que compõe um microcontrolador.



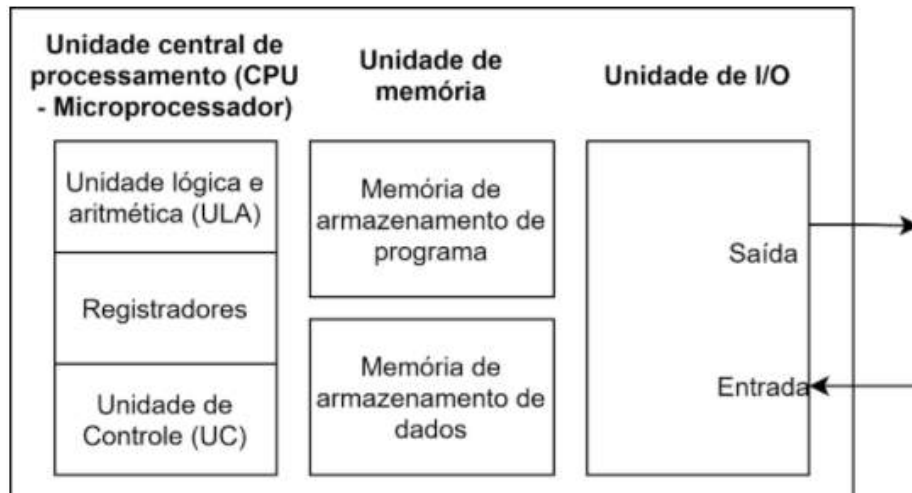


Figura 8 – Elementos que compõe um microcontrolador padrão

### 3.2.1.1 Memórias em microcontroladores

As principais unidades de memória de um microcontrolador são a memória de programa e a memória de dados. A memória de programa consiste em um elemento de memória não volátil no qual as instruções do programa que deve ser executado no microcontrolador são armazenadas. Tradicionalmente, memórias de programa são memórias do tipo ROM, atualmente, o tipo mais comum de memória de programa é a memória Flash (MATHUR; PANDA, 2016).

A memória de dados consiste na memória que armazena os dados durante a execução do programa. Esta memória é do tipo volátil, ou seja, após a desenergização do microcontrolador os dados são apagados. Esta memória é composta de registradores, cada registrador é referente a um endereço da memória de dados. Basicamente, os registradores podem ser divididos em dois tipos, registradores especiais e registradores de propósito geral. O primeiro tipo consiste em espaços da memória que foram reservados pelo fabricante para executar alguma função especial. Como exemplo, podemos citar registradores de *timers*, que armazenam informações sobre a contagem do *timer* do microcontrolador. Ou registradores que realizam a configurações de funções, como a configuração dos periféricos de conversão AD ou de PWM. Usualmente, memórias de dados são memórias do tipo RAM (SOUZA, 2009).

Um terceiro tipo de memória usualmente encontrado em microcontroladores consiste na memória para dados do usuário. Este tipo de memória é utilizado para armazenar dados a longo ou médio prazo, como por exemplo para armazenar um histórico de leituras de um sensor. Desta forma, este tipo de memória não é volátil e o usuário pode escrever ou ler diretamente nos endereços deste tipo de memória durante a execução do programa, diferentemente do que tradicionalmente acontece com a memória de programa, por exemplo, que só pode receber operações de escrita quando o funcionamento do microcontrolador é

interrompido, com exceção de algumas arquiteturas de microcontroladores como o MSP430. Normalmente memórias do tipo EEPROM são utilizadas como memórias de dados de usuário. Essas memórias são memórias do tipo não volátil, como as tradicionais PROM, mas que permitem os processos de escrita e leitura além de permitirem que seu conteúdo seja apagado de forma elétrica (SOUZA, 2009).

### 3.2.2 Circuitos complementares

Para o correto funcionamento de um sistema embarcado, são necessários circuitos complementares que devem ser conectados ao hardware principal de processamento (microcontrolador) do projeto para seu correto funcionamento. Usualmente, os circuitos complementares consistem em circuitos de alimentação, de oscilação e de reset.

O circuito de alimentação tem como finalidade fornecer energia elétrica para os elementos de hardware, tais como o microcontrolador, os sensores, displays LCD, entre outros. Ao utilizar um circuito de alimentação, deve-se atentar a tensão de alimentação de cada elemento que compõe o SE, pois os níveis de tensão adequados para cada dispositivo podem ser diferentes.

Ressalta-se ainda que a fonte de energia selecionada deve ser condizente com as características do sistema embarcado. Por exemplo, um sistema embarcado móvel, deve ser alimentado por uma fonte que também seja móvel. Além disso, o consumo de energia do SE deve ser levado em consideração durante o projeto ou escolha da fonte.

As características principais esperadas de um circuito de alimentação são relacionadas com um nível de tensão estável e com pouco *ripple*, nível de corrente adequado para a operação do sistema, grau de eficiência energética elevado, operação estável para uma determinada faixa de temperatura e filtragem de ruídos.

Existem diferentes tipos de fonte de alimentação, dentre as fontes primárias, podem ser citadas as fontes de parede e as baterias. As fontes de alimentação de parede recebem em sua entrada energia fornecida pela rede elétrica e em sua saída fornecem uma tensão contínua cujo nível depende de sua especificação. Fontes de alimentação por bateria consistem em dispositivos que possuem circuitos de armazenamento e gerenciamento de carga, podendo ser recarregadas várias vezes durante a sua vida útil. Também existem fontes de parede que possuem baterias e fontes de alimentação por bateria que não possuem circuitos de carga embutidos, ou seja, não permitem a recarga direta (SHIN-TING, 2019).

O projeto de uma fonte CC para utilização em um sistema embarcado pode ser dividido em quatro etapas simples, apresentadas na Figura 9.



Figura 9 – Etapas do projeto de uma fonte de alimentação

A etapa do transformador consiste no rebaixamento do nível da tensão CA fornecida pela rede elétrica. Em seguida, a tensão alternada fornecida pela rede passa por um processo de retificação para se tornar uma tensão CC. O ripple proveniente do processo de retificação depende do tipo de circuito utilizado e é minimizado pelo processo de filtragem. O último estágio da fonte CC consiste no processo de regulação, onde são utilizados circuitos de condicionamento de energia para regular os níveis de tensão CC para um nível adequado à operação de sistemas embarcados, geralmente de 3,3 V até 12 V (SHIN-TING, 2019).

Para o projeto ou especificação de uma fonte de parede, usualmente são utilizadas tensões CA de entrada de 127 V/220 V para tensões de saída CC de 3,3 V a 12 V. Os principais parâmetros que especificam este tipo de fonte são sua tensão e corrente de saída, que devem ser adequados aos limites dos elementos do SE que será alimentado.

Dentre os outros circuitos complementares de SE, o circuito de reset é utilizado para causar um reset no software do sistema. Ou seja, quando acionado, o circuito de reset faz com que o processamento do software embarcado seja interrompido e reinicializado, não havendo a desenergização do microcontrolador e de seus periféricos, como ocorre com outros tipos de reset. O circuito de oscilação, por sua vez, tem como função gerar o sinal do *clock* para o microcontrolador. O sinal de *clock* é um sinal que fornece o sincronismo para que o microcontrolador execute suas instruções de forma correta (ADAMU et al., 2012).

Atualmente, graças às placas de desenvolvimento, como Arduíno e ESP32, os microcontroladores já vem acompanhados de circuitos de oscilação e de reset, não sendo necessária a utilização de circuitos externos para esta finalidade. Além disso, o condicionamento do sinal de alimentação também é realizado pelas placas de desenvolvimento. Portanto, ao se utilizar uma placa como o ESP32, o único circuito complementar que deve ser especificado é o circuito de alimentação que deve ser composto por uma fonte alimentação que seja capaz de suprir energia de forma adequada para o microcontrolador e para os diversos periféricos do sistema.

### 3.2.3 Protocolos de comunicação em SEs

Sistemas embarcados são compostos por diferentes elementos que interagem entre si para desenvolver uma tarefa específica; os protocolos de comunicação determinam como é realizada a comunicação entre esses elementos. Apesar de no SE existirem elementos especificamente destinados para realizar a comunicação dos dados entre a unidade de processamento e o destino final, todas as conexões entre os módulos que compõe o SE são regidas através de protocolos de comunicação. Por exemplo, a conexão entre os módulos sensores e a unidade de processamento, pode ser feita via protocolo I2C, SPI ou outros (STASZEWSKI; JABŁOŃSKI; DZIEDZIECH, 2018).

Pode-se categorizar os protocolos de comunicação de acordo com os elementos

que que eles conectam, de forma que tem-se protocolos de comunicação dedicados à comunicação entre os elementos de um sistema embarcado e protocolos dedicados à comunicação entre o sistema embarcado e um gateway da rede. Nesta última classe, ainda podem ser diferenciados os protocolos sem fio (*wireless*) e os protocolos com fio (STASZEWSKI; JABŁOŃSKI; DZIEDZIECH, 2018).

Dentre os protocolos de comunicação que interligam os elementos que compõem um sistema embarcado, no caso de SEs focados no monitoramento da condição de equipamentos, a principal conexão é a realizada entre os elementos sensores e a unidade de processamento, ou seja, o microcontrolador. Dentre os protocolos de comunicação utilizados neste contexto, os principais consistem nos protocolos de comunicação serial, tais como I2C, SPI e UART. O tipo de protocolo escolhido depende do tipo de conexão definida pelo sensor, da disponibilidade de conexões no microcontrolador e de características físicas da conexão, como distância disponível, por exemplo (STASZEWSKI; JABŁOŃSKI; DZIEDZIECH, 2018).

Considerando os protocolos de comunicação utilizados para realizar a troca de informações entre o SE e o gateway da rede, podem ser citados *bluetooth*, *wifi*, *zigbee* e *LoRa*, como exemplos de comunicação sem fio, e os protocolos *modbus* e *can-bus* como protocolos com fio (STASZEWSKI; JABŁOŃSKI; DZIEDZIECH, 2018).

### 3.2.3.1 Tecnologia LoRa

A comunicação LoRa consiste em uma tecnologia desenvolvida pela *Semtech* que se enquadra na classe de tecnologias do tipo LPWA (*Low power wide area*, ou baixa potência e largo alcance, em português), sendo LoRa a sigla determinada para longo alcance (*Long range*). A LPWA consiste em um conjunto de tecnologias que permitem comunicação em uma ampla região, com um perfil de consumo energético otimizado. Este tipo de tecnologia é muito utilizado em aplicações de internet das coisas, como redes de sensores, por exemplo, por se tratarem de aplicações que requerem a transmissão de uma pequena quantidade de dados por uma longa distância (SINHA; WEI; HWANG, 2017).

A comunicação LoRa consiste em uma tecnologia recente, que se tornou popular em aplicações com sistemas embarcados, tendo em vista que estes sistemas usualmente almejam baixo consumo energético, pois por serem alimentados por fontes simples ou por baterias, um protocolo de comunicação que requer um baixo consumo de energia se torna vantajoso para este tipo de aplicação (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

Na tecnologia LoRa, a nomenclatura LoRa define a camada física do sistema, enquanto o termo LoRaWAN (*LoRa Wider Area Network*) define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema. Detalhes sobre cada um desses termos são apresentados a seguir.

## Modulação LoRa

A modulação do sinal enviado na camada física LoRa baseia-se no conceito de *Frequency Shift Keying* (FSK), uma técnica de modulação digital na qual os valores 1 e 0 dos números binários são representados, respectivamente, por diferentes valores de frequência. Mais especificamente, a camada física LoRa utiliza a tecnologia de modulação denominada *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Um chirp consiste em um sinal senoidal cuja frequência aumenta ou diminui com o tempo. Existem dois tipos de chirp: o *up chirp*, que representa sinais cuja frequência varia da baixa para a alta, e os *down chirps*, que consistem em sinais que variam da alta frequência para a baixa frequência. Os diferentes tipos de chirps são ilustrados na [Figura 10](#). A informação a ser enviada é codificada através da varredura da frequência por períodos de tempo pré-determinados. A modulação chirp consiste em uma modulação do tipo digital com espectro de dispersão, na qual os valores 1 e 0 do sinal digital que se deseja enviar são convertidos em um conjunto de chirps, também denominados de símbolos, e estes são enviados um após o outro utilizando um sinal portador de frequência fixa ([PRAJZLER, 2024](#); [KIM](#); [LEE](#); [KIM, 2019](#); [ENRIKO et al., 2023](#); [CHALACAN, 2020](#)).

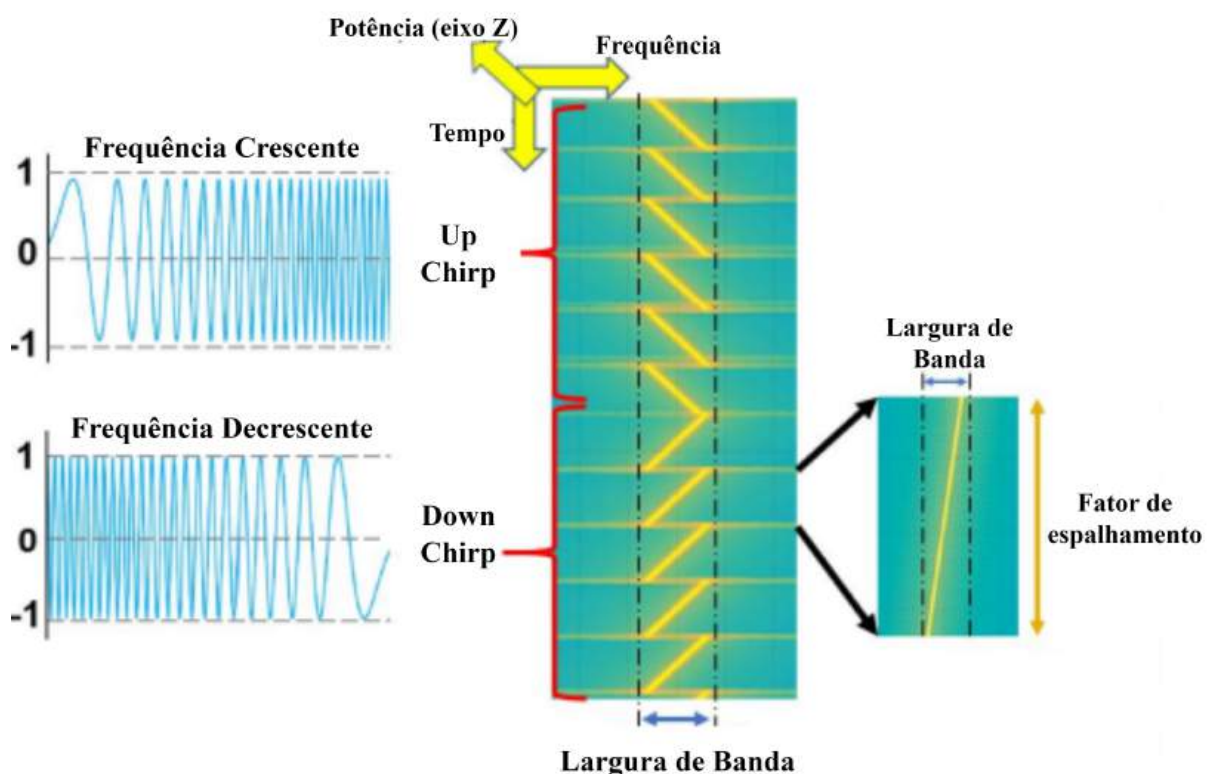


Figura 10 – Ilustração dos tipos de chirp utilizados na modulação. Fonte: ([PRAJZLER, 2024](#))

Na [Figura 10](#), além da representação dos chirps, também é possível observar a indicação da largura de banda utilizada. A largura de banda indica a capacidade máxima

existente para o envio de dados dentro de um período de tempo pré-determinado, por se tratar de uma frequência de envio de informações, sua unidade é o Hertz (Hz). Determinados valores são permitidos para a configuração da largura de banda do LoRa, sendo esses 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. Ademais, verifica-se que quanto maior a largura de banda, maiores as taxas de envio de dados (PRAJZLER, 2024; KIM; LEE; KIM, 2019; ENRIKO et al., 2023; CHALACAN, 2020).

O fator de espalhamento (*spreading factor* - SF) também é um aspecto essencial no processo de modulação realizado pelo LoRa. Este parâmetro define a taxa de varredura de um chirp, ou seja, em quanto tempo o chirp será varrido. Quanto maior o fator de espalhamento, mais simples é o processo de demodulação do sinal, o chirp será varrido por mais tempo, o que acarreta em uma transmissão mais lenta. Tradicionalmente, o fator de espalhamento varia entre SF7 e SF12, sendo 6 valores possíveis. A Figura 11 a seguir apresenta a comparação entre diferentes taxas de varredura (fator de espalhamento) dos chirps considerando a mesma largura de banda. Observa-se como fatores de espalhamento maiores (mais a direita) ocasionam em uma varredura maior e, conseqüentemente, o sinal apresenta um "tempo no ar" mais elevado (PRAJZLER, 2024; KIM; LEE; KIM, 2019; ENRIKO et al., 2023; CHALACAN, 2020).

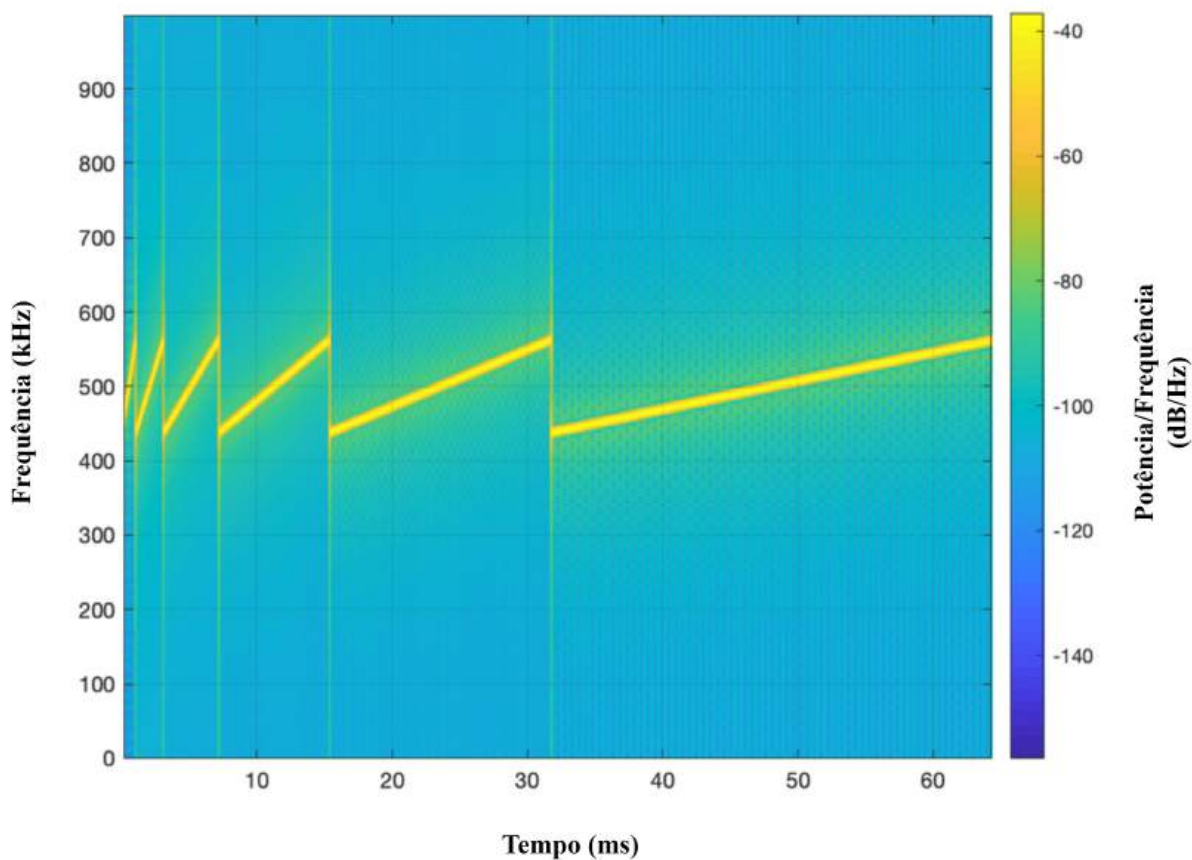


Figura 11 – Comparação entre diferentes valores de fator de espalhamento. Na imagem, o fator de dispersão é variado do seu valor mínimo (SF7) ao máximo (SF12) da esquerda para a direita. Fonte: (PRAJZLER, 2024)

Com base nos dois parâmetros definidos anteriormente, pode-se avaliar a estrutura física de um pacote de transmissão LoRa. Este é composto por três partes: o preâmbulo, a sincronização e a informação (dados). O preâmbulo é composto por uma sequência de oito chirps ascendentes; a etapa que se segue consiste na sincronização, na qual são verificados dois chirps descendentes; após as duas etapas anteriores, os dados que se deseja transmitir são codificados em chirps e são enviados utilizando alguma parcela da largura de banda (PRAJZLER, 2024; KIM; LEE; KIM, 2019; ENRIKO et al., 2023; CHALACAN, 2020). A estrutura desse pacote de transmissão pode ser reconhecida por qualquer gateway LoRa e é apresentada na Figura 12.

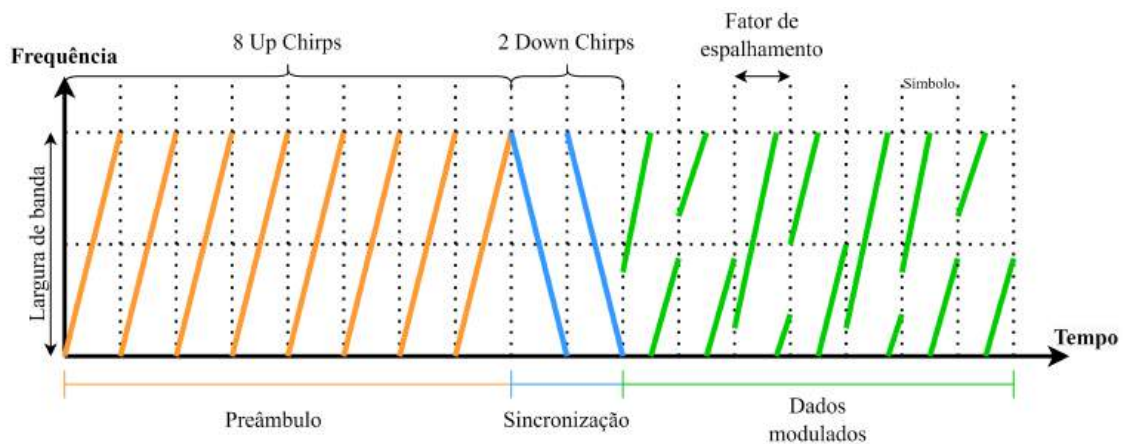


Figura 12 – Ilustração da estrutura de um pacote de transmissão LoRa. Adaptado de: (CHALACAN, 2020)

Um último aspecto relevante para entender a completa estrutura de um pacote de transmissão LoRa consiste na taxa de códigos (*coding rate*). Esta taxa define o código para a correção de erros e consiste no envio de bits extras que operam como bits de paridade. Como exemplo, pode-se avaliar a tradicional taxa de código  $4/5$ . Para essa taxa, tem-se que serão enviados 4 bits de informação para os 5 bits que serão enviados no total. O bit extra consiste em um bit de redundância, que permite que o receptor da mensagem recupere o sinal caso este tenha sofrido erros na transmissão. Dependendo do erro, apenas um bit pode não permitir a restauração do sinal, mas garante a indicação da ocorrência do erro. Assim como para os parâmetros anteriores, a alteração da taxa de código afeta a taxa de envio de dados. Verifica-se que, quantos mais bits redundantes forem enviados, menor é a taxa de envio de dados (PRAJZLER, 2024; KIM; LEE; KIM, 2019; ENRIKO et al., 2023; CHALACAN, 2020).

Combinando os parâmetros verificados anteriormente é possível variar a taxa de dados enviada. As seguintes considerações são válidas:

- Quando menor o fator de dispersão, mais chirps são enviados por segundo - há uma maior taxa de transmissão de dados;

- Fatores de dispersão elevados garantem um aumento do tempo no ar do sinal, o que permite a transmissão desses para distâncias maiores;
- A largura de banda é diretamente proporcional a taxa de transmissão de dados, quanto maior a largura de banda, maior a taxa de transmissão;
- Quanto mais bits redundantes enviados, menor a taxa de transmissão de dados;
- Quanto mais bits redundantes enviados, maior a resiliência da mensagem contra erros.

Dessa forma, torna-se evidente que a seleção desses parâmetros deve obedecer às especificações do projeto. Fatores como a qualidade da informação enviada, a distância de envio e a velocidade de transmissão são elementos mutuamente exclusivos que devem ser equilibrados para assegurar a adequação ao projeto.

#### Arquitetura LoRaWAN

Em relação ao protocolo de comunicação LoRaWAN, a arquitetura definida por ele é do tipo estrela para longas distâncias, tal como apresentado na [Figura 13](#) (ALLIANCE, 2015).

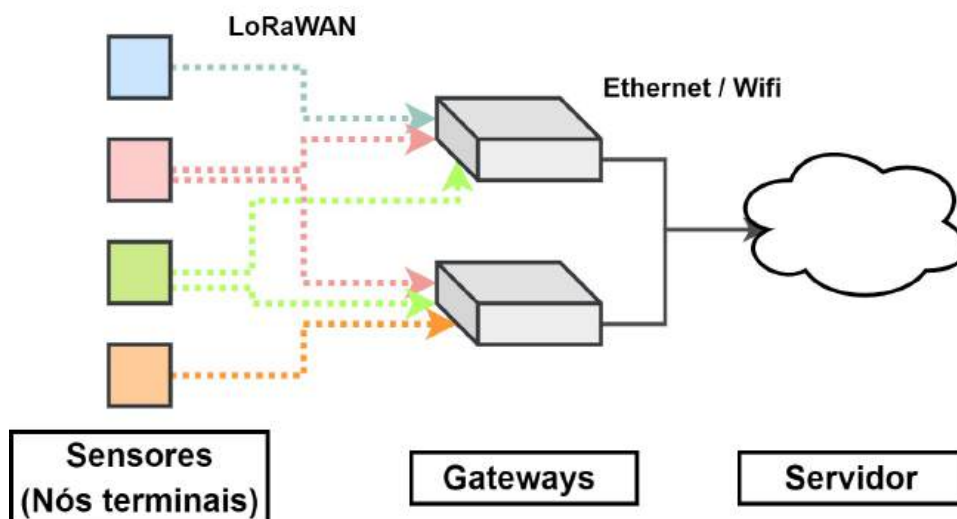


Figura 13 – Esquemático de uma rede de comunicação com arquitetura LoRaWAN

Nesta arquitetura, tem-se como elementos principais os nós finais do sistema, os *gateways* e o servidor da rede. O fluxo de informação se origina nos nós terminais, usualmente sensores, que transmitem essa informação para os inúmeros *gateways* disponíveis; cada sensor pode transmitir informação para um ou mais *gateways*. Como vários *gateways* recebem e repassam as mesmas informações dos mesmos sensores, os dados transmitidos são redundantes e é possível selecionar a informação com melhor qualidade para uso final (SINHA; WEI; HWANG, 2017; ALLIANCE, 2015).



Os *gateways* recebem as informações e as repassam para o servidor da rede utilizando sinal de celular, ethernet, wifi ou outros. Desta forma, os *gateways* operam como um elemento intermediário, cuja função é converter os pacotes de radio frequência recebidos em pacotes IP, para serem recebidos pelo servidor (ALLIANCE, 2015). Por fim, o servidor da rede tem o papel de filtrar os pacotes duplicados, enviar o sinal de confirmação para os *gateways*, garantir a segurança da comunicação e encaminhar a informação recebida para a sua aplicação específica (SINHA; WEI; HWANG, 2017). Ressalta-se ainda, que todos os elementos da rede conseguem se comunicar de forma bidirecional, de modo que o fluxo de informações pode partir do servidor para os nós do sistema.

O protocolo LoRaWAN utiliza as faixas de frequência ISM (Industrial Scientific and Medical), que consistem em um espectro de frequência livre, que não requer licenciamento. As faixas de frequência utilizadas pelo rádio LoRa dependem da localidade, podendo ser 169 MHz, 433 MHz (Ásia), 868 MHz (Europa), 915 MHz (América do Norte), entre outros. No Brasil e no restante da América latina, utiliza-se a faixa de frequência do padrão australiano, 915–928 MHz (INTERNATIONAL, 2022).

Um exemplo de comparação de protocolo sem fio, é o ZigBee. Este protocolo, por exemplo, possui um alcance menor, variando de 10 a 100 metros. Assim, para transmitir por longas distâncias, são necessários vários dispositivos intermediários recebendo e repassando os dados. Devido à essas características, o ZigBee consiste em um protocolo de comunicação que consome muita energia, o que não é adequado para aplicações com redes de sensores. O uso da comunicação LoRa retira a necessidade de dispositivos intermediários, a comunicação é realizada diretamente entre os nós finais da rede (sensores) e o *gateway* (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

Para aplicações utilizando a tecnologia LoRa, inúmeras placas de desenvolvimento trazem o rádio LoRa integrado, tal como a placa de desenvolvimento do ESP32 Lora 32 Wifi 915 MHz Sx1276 (Figura 14). Além disso, é possível obter o módulo do rádio LoRa individualmente, tal como apresentado na Figura 15.



Figura 14 – Exemplo de placa de desenvolvimento ESP32 com rádio LoRa integrado



Figura 15 – Exemplo de módulo individual de rádio LoRa

### 3.2.4 Periféricos em SE - Sensores e atuadores

Sensores e atuadores consistem em periféricos de um sistema embarcado, sendo componentes vitais para a operação completa deste tipo de sistema. Um sensor pode ser definido como um elemento que mensura uma grandeza física. Enquanto um atuador consiste em um dispositivo que altera uma grandeza física (PAKALA; RAJU, 2010).

Os sensores podem ser analógicos ou digitais, dependendo do seu sinal de saída. Sensores analógicos, usualmente fornecem suas medições a partir de valores de tensão que são proporcionais à grandeza física medida. Os valores de tensão fornecidos pelo sensor são lidos pelo processador do sistema embarcado através de um sistema de conversão analógico-digital (AD). Por sua vez, sensores digitais não necessitam de conversores para se comunicar com o microcontrolador. Ao contrário dos sensores, os atuadores têm seu funcionamento regido através de um sinal de tensão fornecido pelo microcontrolador (OLIVEIRA, 2019).

As grandezas físicas operam em um contexto analógico, por este motivo, é necessário que os sinais medidos sejam quantizados em sua magnitude e amostradas no tempo antes de serem utilizadas como informação pelo microcontrolador. O processo de quantização de um sinal está relacionado com o número de  $n$  bits utilizados para representar este sinal. Desta forma, uma grandeza quantizada em  $n$  bits pode assumir  $2^n$  valores distintos (OLIVEIRA, 2019; GONZALEZ, 2009).

O processo de amostragem de um sinal é realizado em relação ao tempo. Desta forma, um sinal analógico contínuo no tempo será amostrado em pontos específicos do tempo a fim de se criar um sinal discreto. Usualmente o processo de amostragem é realizado utilizando-se um intervalo de tempo específico ( $T$ ), de forma que a taxa de amostragem é definida como o inverso deste período ( $1/T$ ). Ao se amostrar um sinal, deve-se cuidar da frequência de amostragem, garantindo que esta seja pelo menos o dobro da frequência

máxima do sinal - Teorema de Nyquist-Shannon-, evitando assim a ocorrência do fenômeno de *aliasing* (GONZALEZ, 2009).

Além disso, deve-se atentar a precisão do sensor utilizado, sendo que o parâmetro de precisão se relaciona com o grau de variação dos resultados da medição de uma mesma grandeza. E com o processo de calibração dos sensores, em relação à grandeza medida e ao grupo de sensores que estão realizando a medição de tal grandeza (PAKALA; RAJU, 2010).

Por fim, deve-se atentar aos ruídos obtidos durante uma medição. Ao medir uma grandeza real  $x(t)$ , o sinal medido obtido pode ser dado por  $x'(t)$ , que consiste na soma do sinal real mais o ruído ( $x'(t) = x(t) + n(t)$ ). Para realizar a remoção ou atenuação do ruído, deve-se identificar a fonte que o origina. O ruído pode ser inerente do processo de aquisição do sinal, como em máquinas fotográficas, por exemplo, onde cada sensor óptico opera como um filtro passa-baixa no sinal de imagem recebido. A atenuação do ruído pode ser realizada antes da medição, utilizando-se circuitos de filtragem, ou após a medição, utilizando processamento digital de sinais, através de métodos estatísticos para reduzir ruídos (OLIVEIRA, 2019; GONZALEZ, 2009).

### 3.3 Métodos de gerenciamento de tarefas em sistemas embarcados

O desempenho de um sistema embarcado é diretamente relacionado com a metodologia utilizada para gerenciar as tarefas que por ele são executadas. Tais metodologias determinam como será feito o tratamento das tarefas que devem ser realizadas pelo software. Uma das metodologias tradicionais consiste na abordagem *foreground/background*. Todavia, uma das formas mais avançadas que garante o desempenho preciso do SE é utilizando sistemas operacionais em tempo real (HAMBARDE; VARMA; JHA, 2014).

A metodologia *foreground/background* é normalmente utilizada em programas simples, nos quais existem poucas tarefas ou os prazos destas não são rígidos. Nesta metodologia o programa é composto basicamente de um super *loop* que executa tarefas e seus processos, usualmente através da chamada de funções (*background*). Além disso, este sistema pode conter por rotinas de interrupções que irão desviar a execução do código para a execução de seus próprios processos (*foreground*) (BORGES, 2011). Um esquemático desta metodologia é apresentado na Figura 16.

Este tipo de metodologia gera um *loop* não determinístico, de forma que o tempo necessário para a execução pode variar dentre as diversas execuções do *loop*, este aspecto dificulta o controle e a sincronização do tempo de necessário para as tarefas. Além disso, caso haja a necessidade de inserção de novas tarefas, os cálculos de tempo devem ser refeitos, pois o tempo total do *loop* será alterado significativamente (BORGES, 2011).

Uma forma de contornar os problemas de sincronização e temporização encontrados

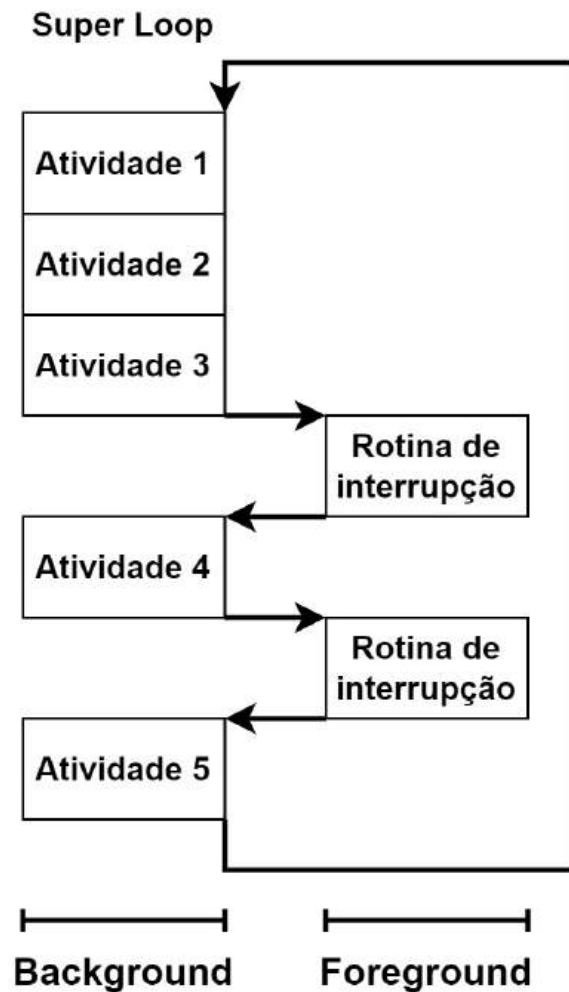


Figura 16 – Metodologia de gerenciamento de tarefas *foreground/background* - Adaptado de (BORGES, 2011)

no uso de metodologias tais como a *foreground/background* consiste no uso de sistemas operacionais em tempo real para realizar o gerenciamento de tarefas.

Os sistemas operacionais podem ser classificados como sistemas de propósito geral (do inglês, *General Purpose Operating Systems* - GPOS) e os de tempo real (do inglês, *Real Time Operating Systems* - RTOS). No contexto geral, sistemas operacionais são responsáveis por gerenciar as tarefas realizadas e por organizar a alocação de recursos entre as tarefas. Os GPOS são encontrados comumente em computadores de uso pessoal, sendo exemplos comuns os sistemas Windows e Linux. Tais sistemas possuem a capacidade de sistemas operacionais de gerenciar recursos de software e hardware garantindo a execução de multitarefas, todavia, o atendimento de prazos não é o foco principal destes sistemas, de forma que a ocorrência de atrasos não é tratada como prioridade (LEROUX, 2005).

Os RTOS consistem em sistemas nos quais o tempo utilizado para produzir um resultado ou executar uma tarefa é tão importante quando a própria tarefa ou resultado (HAMBARDE; VARMA; JHA, 2014). Assim, a principal diferença entre um sistema

operacional de uso geral e um RTOS, consiste no fato de que o segundo apresenta um comportamento determinístico, ou seja, é possível prever os tempos de execução, interrupção e suspensão de cada tarefa sendo executada, além de garantir a sincronização entre tais tarefas (ANH; TAN, 2009).

Os sistemas operacionais genéricos não garantem um certo tempo de resposta, de forma que os prazos não são rígidos, este fato se torna mais acentuado quando diversas tarefas estão sendo executadas em paralelo. Os RTOS operam a partir de agendamentos que são baseados em prioridades e que operam de forma preemptiva. Tais agendamentos controlam como os recursos de processamento do microcontrolador serão alocados entre as tarefas que devem ser executadas (ANH; TAN, 2009).

A aplicação de RTOS facilita a aplicação em multitarefas, pois o uso do gerenciador do sistema, que escalona e sincroniza as tarefas, atua de forma que tem-se a impressão de que as tarefas estão ocorrendo de forma simultânea, tal como apresentado na figura Figura 17.

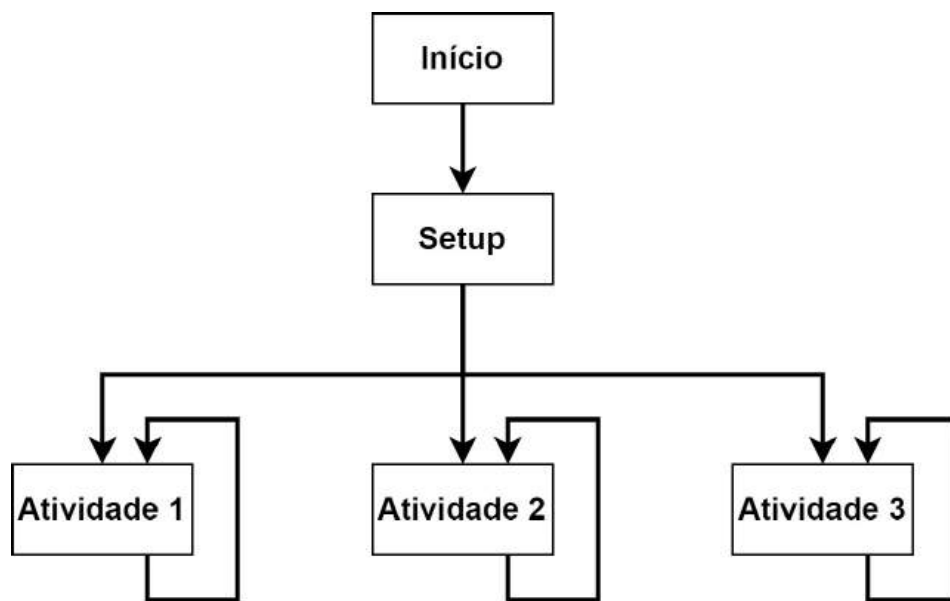


Figura 17 – Metodologia de gerenciamento de tarefas RTOS - Adaptado de (DIGI-KEY, 2021)

Ressalta-se que apesar de o usuário ter a impressão de simultaneidade entre as tarefas, devido ao gerenciamento feito pelo sistema, em microcontroladores de apenas um núcleo estas não são fisicamente executadas de forma simultânea. Desta forma, quanto mais tarefas são alocadas em um único processador, menos passos de cada tarefa serão executadas a cada intervalo determinado para esta tarefa. Para contornar este problema, pode-se utilizar processadores com mais de um núcleo. Assim, as tarefas serão fisicamente executadas de forma simultânea. A programação multi-core traz a vantagem de permitir a execução simultânea de tarefas, todavia, consiste em um tipo de programação com maior complexidade, cabendo ao desenvolvedor organizar a divisão de tarefas entre os núcleos,

evitando problemas que podem surgir devido à recursos compartilhados entre as tarefas (MISTRY; NAYLOR; WOODCOCK, 2014).

### Sistemas Operacionais de Tempo Real

Os RTOS podem ser definidos em duas categorias: *Hard* RTOS e *Soft* RTOS. O primeiro tipo atua focado nos prazos associados com as tarefas que devem ser efetuadas pelo SE, de forma que atrasos não são toleráveis. Enquanto que o segundo tipo, flexibiliza sua operação, tornando perdas de prazos aceitáveis, embora não sejam desejáveis (HAMBARDE; VARMA; JHA, 2014; BORGES, 2011).

Ademais, existem diferentes metodologias que um RTOS pode utilizar para realizar o agendamento de tarefas. A forma mais simples é chamada de agendamento *round-robin*, na qual o processamento é dividido em intervalos de tempo iguais (*ticks*) e estes são distribuídos entre as tarefas e estas são executadas aos poucos de forma que sua execução pareça concorrente. Desta forma, cada tarefa será executada por um período igual de tempo e mesmo caso ela não seja finalizada neste período, ela deve ceder espaço para a próxima tarefa. O revezamento de execução entre as tarefas é repetido até que as tarefas sejam finalizadas (BORGES, 2011; ANH; TAN, 2009). A Figura 18 apresenta um esquemático de como funcionaria esta abordagem.

Outra metodologia comum consiste no agendamento preemptivo, no qual as tarefas recebem prioridades, de forma que uma tarefa de prioridade maior pode interromper o processamento de uma com prioridade menor para ser executada primeiro. Outra alternativa consiste no agendamento cooperativo, no qual a tarefa atual deve acionar o gerenciador de tarefas para que a troca entre tarefas seja realizada (BORGES, 2011; ANH; TAN, 2009). A Figura 19 apresenta um esquemático de como funcionaria a abordagem preemptiva, onde a tarefa 1 é interrompida pela tarefa 2 de maior prioridade, após o fim da tarefa de maior prioridade, a tarefa de menor prioridade é retomada. Ressalta-se que, as interrupções programadas no microcontrolador sempre apresentam prioridade superior a das outras tarefas.

#### 3.3.1 Conceito de tarefas em RTOS

Além de lidar com os prazos das tarefas, os RTOS se baseiam no conceito de prioridade de tarefas para definir a ordem na qual as atividades serão realizadas. Desta forma, quando uma tarefa é criada, pode-se definir sua prioridade de forma que o escalonador do sistema saiba para qual tarefa se deve alocar recursos em cada momento.

De acordo com (BORGES, 2011), em um sistema de tempo real existem tarefas periódicas - as quais executam atividades em intervalos regulares -, tarefas esporádicas - tarefas que apresentam atividades com deadlines que devem ser atendidos e que são executadas em momentos aleatórios -, e tarefas aperiódicas - tarefas que apresentam

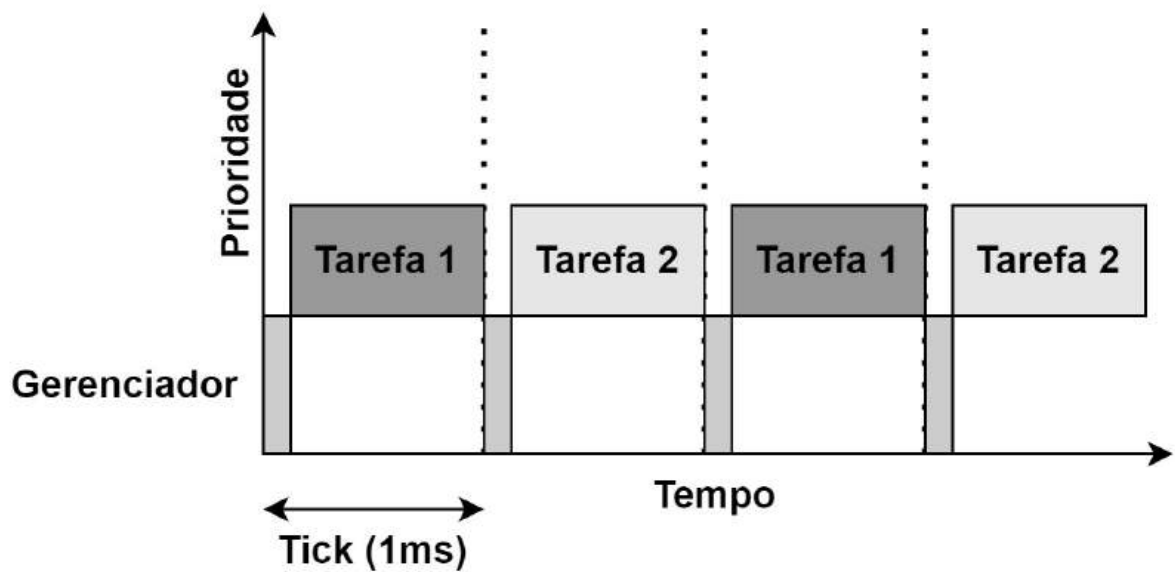


Figura 18 – Abordagem Robin-Round de escalonamento de tarefas - Adaptado de [Digi-Key \(2021\)](#)

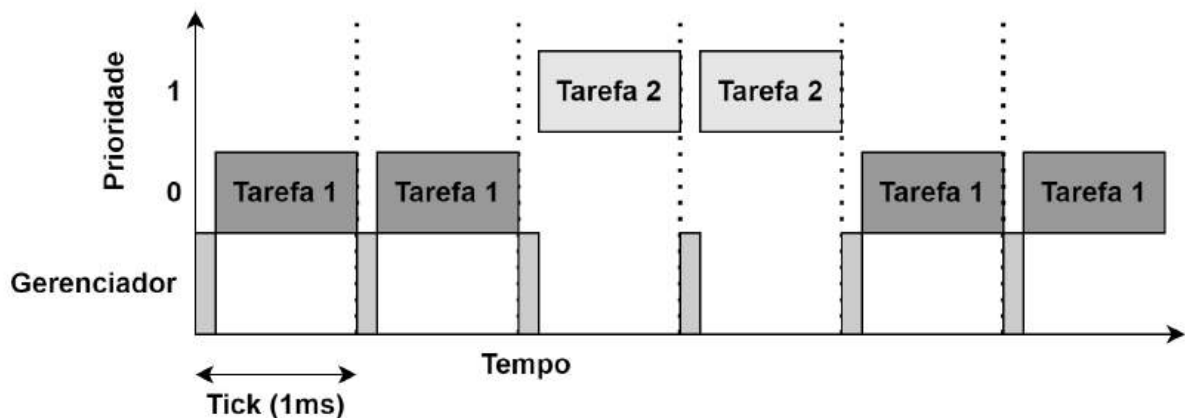


Figura 19 – Abordagem Preemptiva de escalonamento de tarefas - Adaptado de [\)digikey1](#)

atividades que também são executadas em momentos aleatórios, mas que não possuem deadlines rígidos.

Uma tarefa pode estar em quatro estados distintos, são estes estado pronto, suspenso, em execução e estado bloqueado e a relação entre eles é apresentada na [Figura 20](#). Quando uma tarefa é criada, ela se torna uma tarefa no estado disponível, o que indica que ela está pronta para ser executada. Dependendo das outras tarefas disponíveis e de sua prioridade, no início de um novo intervalo de tempo esta tarefa pode ser selecionada para ser executada, passando para o estado de em “execução” ([FREERTOS, 2022b](#)).

A partir do estado em “execução”, uma tarefa pode tanto ser finalizada e retornar para o estado de tarefa “disponível”, quanto ir para o estado bloqueado ou o estado suspenso. Para ir para o estado bloqueado, a tarefa deve ter sido colocada em espera

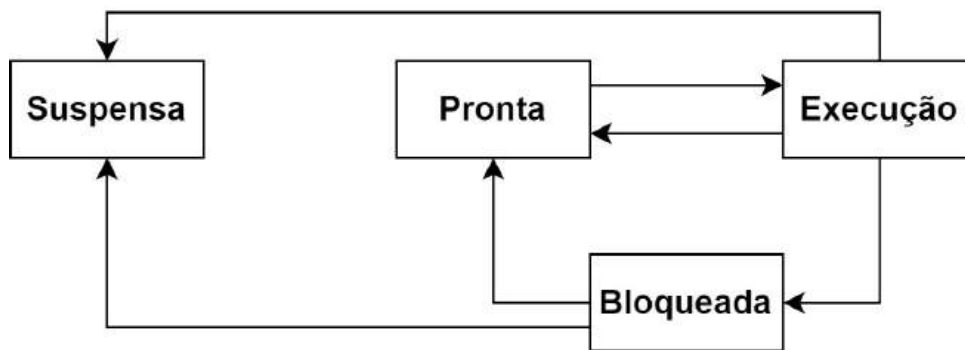


Figura 20 – Estados que uma tarefa pode assumir em um RTOS

internamente através de uma função de atraso. Enquanto uma tarefa está em estado bloqueado, ela deixa de ser executada e deixa de ter recursos a ela alocados, até que ela seja colocada novamente no estado disponível. Uma tarefa pode ficar em estado bloqueado até o fim do atraso pré-determinado, ou até receber algum recurso, tal como um semáforo (FREERTOS, 2022b).

Semáforos são recursos utilizados para garantir a sincronização entre tarefas e a coordenação de acessos a recursos compartilhados, por exemplo, caso deseje-se que uma tarefa inicie um processo apenas após uma outra tarefa ter terminado um outro processo, podem ser utilizados semáforos. Assim, semáforos são objetos do *kernel* que podem ser passados entre tarefas para realizar a sincronização. Uma tarefa pode adquirir ou liberar um semáforo para outra tarefa (FREERTOS, 2022a).

Em relação ao último estado, o de suspensão, tarefas podem ser suspensas a partir de uma função de suspensão, que pode ser chamada por outra tarefa ou pela própria tarefa. Após ser suspensão, uma tarefa apenas pode retornar para o estado de disponibilidade após a suspensão ser encerrada por outra tarefa (FREERTOS, 2022b).

### 3.3.2 Aplicações e vantagens do uso de RTOS

Os RTOS são sistemas usualmente utilizados em aplicações de sistemas embarcados, nos quais o atendimento de prazos durante a execução de tarefas é um fator essencial. O uso de RTOS simplifica aplicações que executam múltiplas tarefas, tais como sistemas embarcados que controlam uma rede de sensores, por exemplo. Pois o escalonador do RTOS é capaz de gerir e sincronizar as tarefas atendendo suas prioridades e garantindo que dados não sejam perdidos (LEROUX, 2005).

Uma das vantagens do uso de RTOS é a simplificação do código, que pode ser modularizado e dividido em mais etapas, otimizando o seu desenvolvimento. Os RTOS também garantem a sincronização entre as tarefas, fator que pode ser complicado quando variáveis globais são utilizadas e que é fundamental quando o SE trata de medidas provenientes de diferentes sensores. Além disso, por simplificar o software, o uso de RTOS



---

agrega robustez ao programa, pois este se torna menos extenso e, conseqüentemente, menos sujeito a erros (ANH; TAN, 2009).

O gerenciamento de tempo torna-se mais simples com o uso de RTOS, pois já existem funções prontas para lidar com estas demandas, de forma que não é necessário trabalhar diretamente com *timers* e registradores e com cálculos de ciclos de máquina, o que tornaria o processo custoso durante o projeto. Além de facilitar na portabilidade do projeto, pois, outro microcontrolador, com outros *timers* e periféricos requereria um software completamente diferente (ANH; TAN, 2009).

Dentre as desvantagens do uso de RTOS, pode-se citar o consumo extra de memória ROM e RAM, que acarreta no aumento do consumo energético. Este aspecto deve ser considerado no projeto para que seja garantido que o sistema desenvolvido atenda as especificações necessárias.

### 3.4 Conclusões do capítulo

Este capítulo apresentou um compilado dos principais tópicos abordados durante o projeto de desenvolvimento de um sistema embarcado. No ponto de vista do hardware do sistema embarcado, foram descritas as características de operação dos microcontroladores, elemento de processamento central de um SE; os principais aspectos analisados durante a implementação dos periféricos do sistema; e os detalhes de funcionamento dos circuitos complementares. Além disso, considerando que esta tese de doutorado visa desenvolver um sistema embarcado capaz de monitorar as grandezas elétricas e ambientais em diversos elementos da subestação e enviar as informações coletadas para uma unidade concentradora na casa de controle, também destacou-se os aspectos de funcionamento da tecnologia de comunicação wireless LoRa. Devido às suas características, esta tecnologia de comunicação foi escolhida para realizar a conexão entre os sistemas de monitoramento instalados na subestação e a unidade concentradora. Por fim, do ponto de vista do software do SE, o capítulo abordou o conceito de RTOS, suas aplicações e vantagens. O uso de RTOS foi realizado neste projeto a fim de gerenciar corretamente a aquisição de grandezas pelos diversos sensores que compõe o sistema embarcado de monitoramento proposto.



## 4 ENSAIOS ELÉTRICOS COM OS ISOLADORES NO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

O aparato experimental para a realização dos ensaios de alta tensão foi construído no laboratório de alta tensão (LAT) da Universidade de São Paulo a fim de avaliar as características elétricas de uma cadeia de 24 isoladores naturalmente poluídos retirados de uma linha de transmissão de 500 kV, na qual ficaram em operação durante o período de um ano em uma região litorânea. Os experimentos foram projetados para avaliar a performance dos isoladores, simulando a sua operação em uma linha de alta tensão, e verificar se houve desgaste na performance devido à camada de poluição acumulada na superfície deste equipamento durante seu período de operação em uma linha de transmissão real.

Considerando o objetivo de avaliar o grau de poluição naturalmente depositado nos isoladores durante sua operação, a extração e o transporte dos isoladores foram realizados com rigorosos cuidados para garantir a preservação do nível de contaminantes. Após a remoção da cadeia da LT, os isoladores foram embalados individualmente com cuidado para evitar qualquer contato com suas superfícies durante o transporte. Os mesmos cuidados no manejo dos isoladores foram mantidos durante os procedimentos no laboratório.

Os ensaios elétricos foram divididos em quatro fases principais, sendo estas:

- Ensaios de alta tensão com os isoladores contaminados naturalmente;
- Ensaios de alta tensão com os isoladores contaminados naturalmente e com umidificação artificial;
- Ensaios de alta tensão com os isoladores limpos;
- Ensaios de alta tensão com os isoladores limpos e com umidificação artificial;

Ressalta-se que os contaminantes foram retirados dos isoladores seguindo as indicações previstas em norma, para que análises químicas e medições de parâmetros como DDSE e DDNS pudessem ser obtidas. Os resultados de tais análises não fazem parte do escopo desta tese de doutorado.

### 4.1 Arranjo experimental

O arranjo experimental foi construído baseado em dois objetivos principais: fornecer um nível de tensão elevado para o isolador testado; permitir conexões para a medição de corrente e tensão sobre tal isolador. Em todas as etapas dos ensaios foi utilizado o kit de equipamentos de alta tensão *Haefely*, que contém componentes que podem ser conectados

de diversas formas para criar diferentes esquemas de teste. Dentre os equipamentos e peças disponíveis no kit, os seguintes foram utilizados para construir o circuito dos ensaios elétricos com os isoladores:

- Transformador de tensão CA monofásico (PZT 100-0.1): Transformador de teste que pode ser utilizado para geração de tensão AC. Sua relação de tensão é dada por 220V / 100kV - Apresentado na [Figura 21](#).



Figura 21 – Transformador de tensão PZT 100-0.1

- Transformador regulador: utilizado para manter constante a tensão de saída do circuito, filtrando eventuais variações da tensão de entrada - Apresentado na [Figura 22](#).



Figura 22 – Transformador regulador

- Capacitor de medição de 100 pF: Capacitor utilizado na configuração de tensão alternada para o divisor de tensão CA - Apresentado na [Figura 23](#).
- Parte secundária do capacitor de medição: parte do divisor de tensão CA que é conectada entre o capacitor de medição e o cabo de medição. Este cabo pode ser conectado à um equipamento de medição (tal como um osciloscópio) para obter a tensão medida no divisor de tensão - Apresentado na [Figura 24](#).

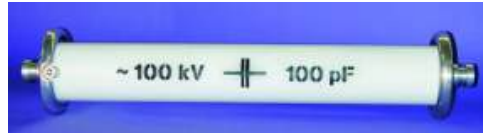


Figura 23 – Capacitor de medição de 100 pF



Figura 24 – Parte secundária do capacitor de medição

- Resistor de medição de 280 M $\Omega$ : resistor utilizado no divisor de tensão DC - Apresentado na [Figura 25](#).

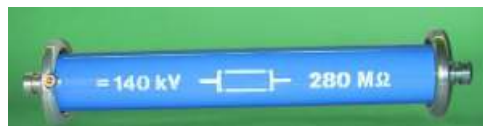


Figura 25 – Resistor de medição de 280 M $\Omega$

- Resistor de medição de 1200  $\Omega$ : resistor utilizado no divisor de tensão CC - Apresentado na [Figura 26](#).



Figura 26 – Resistor de 1200  $\Omega$

- Parte secundária do resistor de medição: parte do divisor de tensão CC. É conectada entre o capacitor de medição e o cabo de medição. Este cabo pode ser conectado à um equipamento de medição (tal como um osciloscópio) para obter a tensão medida no resistor - Apresentado na [Figura 27](#).



Figura 27 – Parte secundária do resistor de medição

- Haste de descarga e aterramento: utilizada para realizar a conexão entre o circuito de alta tensão e o ponto de aterramento. Sua utilização visa a segurança do profissional que está lidando com o kit de alta tensão - Apresentado na [Figura 28](#).



Figura 28 – Haste de descarga e aterramento

- Haste de conexão: Consiste em uma haste de material condutivo utilizada para conectar partes do circuito que estão no mesmo potencial - Apresentado na [Figura 29](#).



Figura 29 – Haste de conexão

- Encaixe de conexão: Consiste em um encaixe de material condutivo utilizado para apoiar e conectar partes do circuito de alta tensão, como resistores e capacitores - Apresentado na [Figura 30](#).



Figura 30 – Encaixe de conexão

- Unidade de controle: Terminal de operação OT276. Este terminal controla o transformador regulador; por meio dele é possível controlar a corrente e a tensão no lado secundário do transformador regulador, que é, por sua vez, conectado ao transformador de teste - Apresentado na [Figura 31](#).
- Osciloscópio: Utilizado para a medição e armazenamento das formas de onda de tensão obtidas nos divisores de tensão CA e CC - Apresentado na [Figura 32](#).



Figura 31 – Unidade de controle

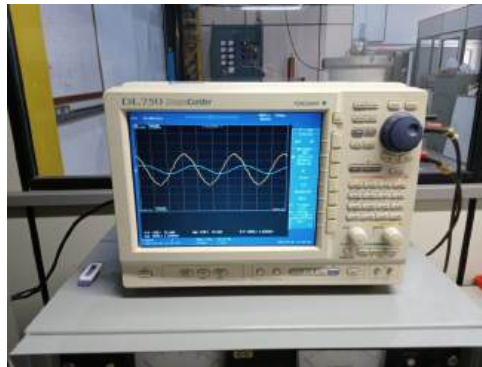


Figura 32 – Osciloscópio

Os elementos do kit como capacitores, resistores e transformadores, podem ser conectados entre si utilizando as hastes e os encaixes de conexão, além do pedestal disponível. Desta forma, o kit permite que inúmeras configurações sejam montadas, entre elas configurações para tensão alternada de até 300 kV, para tensão contínua de até 400 kV e para testes de impulso. No caso dos ensaios elétricos realizados para esse projeto, foi utilizada uma configuração prevista no manual para uma tensão alternada de até 200 kV, para isso, o kit foi utilizado seguindo a configuração de tensão alternada de estágio 2, que utiliza dois transformadores PZT 100-0.1 para alcançar uma tensão de saída de até 200 kV.

Para esta configuração, um dos transformadores de teste tem seu enrolamento primário conectado ao transformador regulador, que é alimentado por uma fonte principal que fornece uma tensão de 230 V. Além disso, nesse circuito, os dois transformadores de teste são conectados em uma configuração de cascata, atingindo uma tensão de até 200 kV. Tais transformadores são conectados entre si através da conexão do enrolamento terciário do primeiro transformador, com o enrolamento primário do segundo. Para realizar a medição da tensão no lado de alta tensão, dois capacitores de medição de 100 pF são conectados em série ao circuito. O esquemático das conexões entre os transformadores para essa configuração é apresentado na [Figura 33](#).

A partir desse esquemático, é possível descrever as conexões realizadas para a montagem do circuito. Para isso, deve-se considerar que, para os dois transformadores, S0 representa o início do enrolamento secundário; S é o fim de alta tensão do enrolamento secundário; e T é o fim do enrolamento terciário. O enrolamento de baixa tensão do

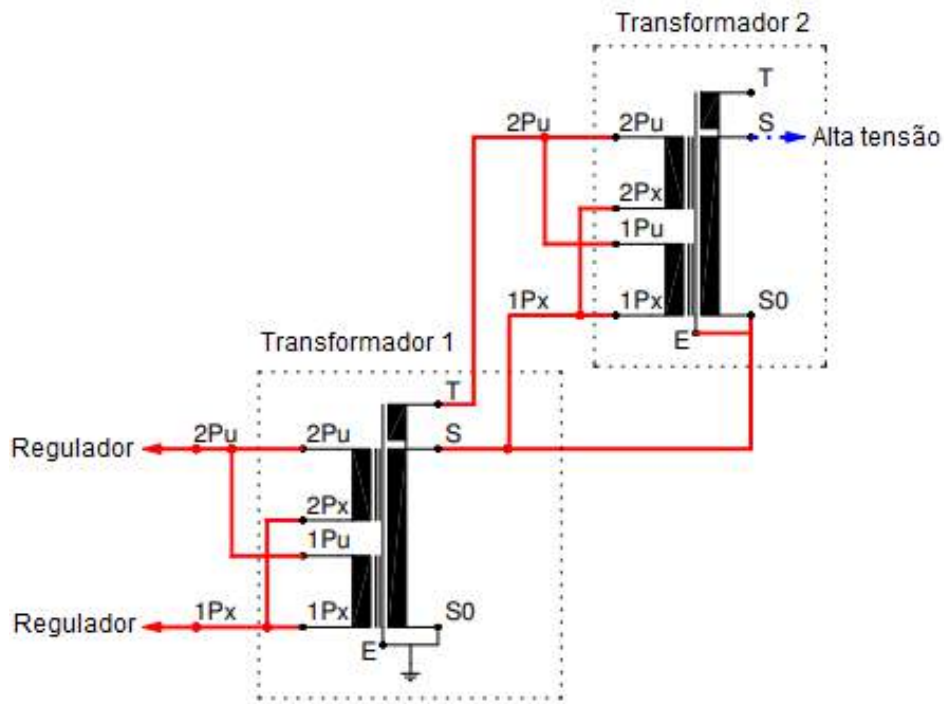


Figura 33 – Esquemático de conexão dos transformadores na configuração de cascata - Adaptado de [Ahl e Rehm \(2018\)](#)

transformador consiste em dois grupos de enrolamento ( $1Px - 1Pu$ ,  $2Px - 2Pu$ ), que devem ser conectados em paralelo para a operação em cascata. As conexões seguem os seguintes passos:

1. O transformador 1 deve ser conectado ao terra.
2. Os enrolamentos primários dos transformadores devem ser conectados em paralelo –  $1Px$  deve ser conectado com  $2Px$  e  $1Pu$  com  $2Pu$ , conforme apresentado na [Figura 34](#).

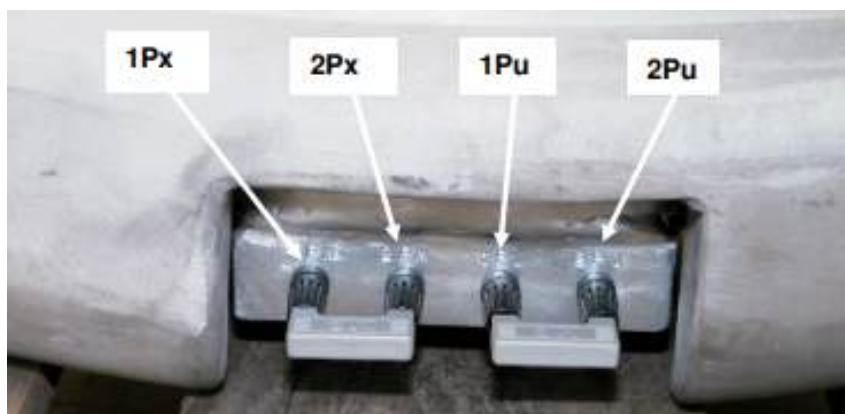


Figura 34 – Conexão em paralelo dos enrolamentos primários dos transformadores - Fonte: [Ahl e Rehm \(2018\)](#)



3. O terminal S0 do transformador 1 deve ser conectado ao terminal E desse transformador, conforme apresentado na [Figura 35](#);
4. Os cabos de força provenientes do transformador regulador devem ser conectados aos terminais 1Px e 2Pu do transformador 1, conforme apresentado na [Figura 35](#);

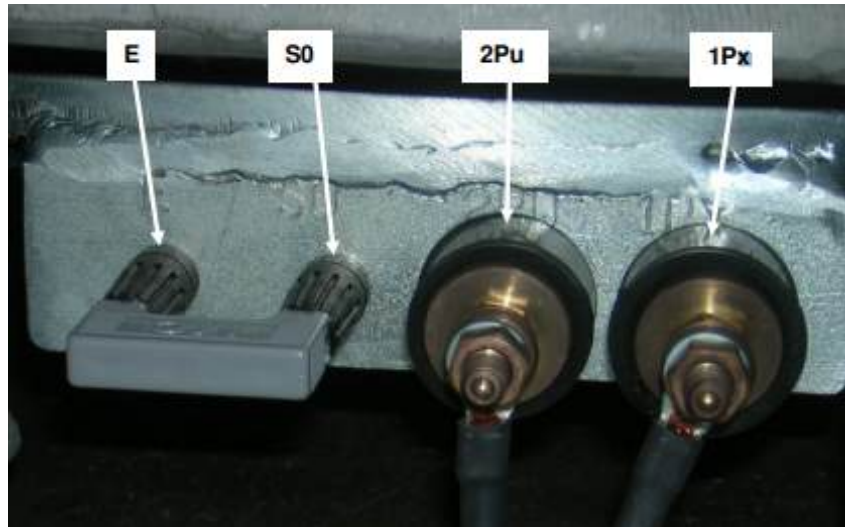


Figura 35 – Conexões do enrolamento de baixa tensão do transformador 1 - Fonte: [Ahl e Rehm \(2018\)](#)

5. Para a conexão entre os transformadores, deve-se seguir o apresentado na [Figura 36](#):
  - a) O terminal T do transformador 1 deve ser conectado ao terminal 2Pu do transformador 2;
  - b) O terminal S do transformador 1 deve ser conectado ao terminal 1Px do transformador 2;
  - c) O terminal S do transformador 1 deve ser conectado ao terminal S0 do transformador 2;
  - d) O terminal S0 do transformador 2 deve ser conectado ao terminal E deste mesmo transformador

Todo o circuito utilizado foi construído utilizando as conexões de aterramento para garantir a segurança da operação – a estrutura foi aterrada através de uma barra de terra, que é desconectada durante a operação e conectada após o encerramento; após o fim da operação, também é utilizada uma haste de aterramento como segurança adicional para garantir que todos os elementos do circuito foram descarregados. O circuito final, com os dois transformadores conectados em cascata e com os divisores de tensão resistivos e capacitivos é apresentado na [Figura 37](#) e seu esquemático elétrico é apresentado na [Figura 38](#).

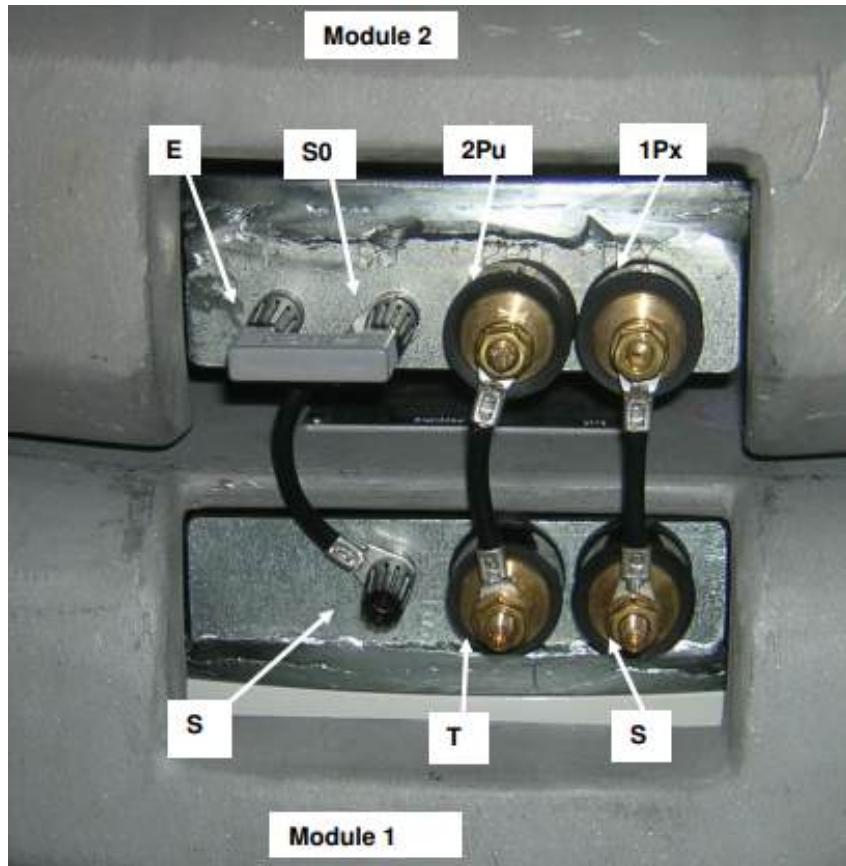


Figura 36 – Detalhe da conexão entre os transformadores - Fonte: Ahl e Rehm (2018)



Figura 37 – Circuito final do ensaio CA com dois transformadores conectados em cascata

Após a construção do circuito, foi feita a calibração deste a fim de se obter seus parâmetros. A primeira calibração foi feita apenas considerando os divisores de tensão sendo alimentados por uma fonte externa de tensão variável conectada em paralelo com os divisores. Os dados obtidos nesse processo são apresentados na [Tabela 2](#) e o circuito de

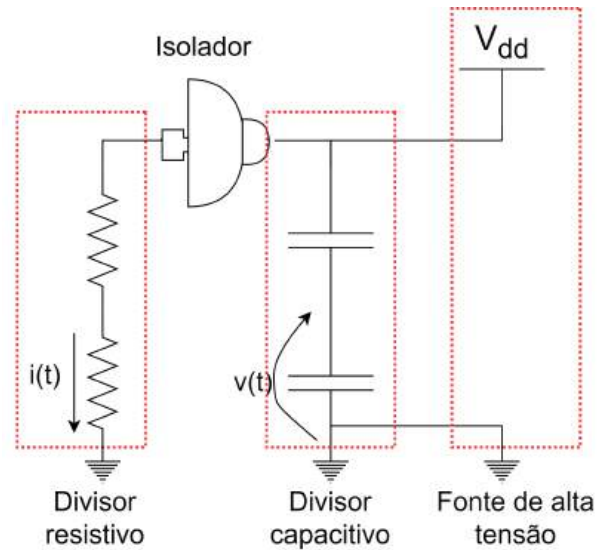


Figura 38 – Esquemático elétrico do circuito final do ensaio CA

Tabela 2 – Medições para o processo de calibração

Tensão entrada ( $V_{rms}$ )	Tensão $V_{divV}$ (mV)	Tensão $V_{divR}$ (mV)
49,7	84,20	10,595
99,7	187,13	17,973
150,2	292,70	24,963
201,8	398,97	33,375
248	496,17	40,450

calibração é apresentado na [Figura 39](#).

Na [Tabela 2](#), a tensão  $V_{divV}$  representa a tensão pico-pico medida em mV no divisor de tensão capacitivo; a tensão  $V_{divR}$  representa a tensão pico-pico medida em mV no divisor de tensão resistivo e a tensão de entrada foi medida a partir da fonte utilizada para a calibração, sendo apresentada em valor RMS. Para obter as relações de ganho de tensão e de corrente, considerou-se as tensões  $V_{divV}$  e  $V_{divR}$  na mesma unidade da tensão de entrada ( $V_{rms}$ ), com isso, os gráficos das [Figuras 40 e 41](#) foram construídos. Ressalta-se que o gráfico de  $V_{divR}$  ([Figura 41](#)) é mostrado em amperes e foi construído considerando a resistência de  $276\text{ M}\Omega$  medida para o circuito divisor de tensão resistivo.

A partir da inclinação dos gráficos é possível obter a relação de ganho de tensão e corrente, respectivamente. Essas informações foram utilizadas para ajustar o osciloscópio durante as medições.

- Relação de ganho de tensão: 1361,856;
- Relação de ganho de tensão com ajuste da origem: 1434,4;
- Relação de ganho de corrente 14706,00
- Relação de ganho de corrente com ajuste da origem: 14720,3



Figura 39 – Circuito CA utilizado para calibração

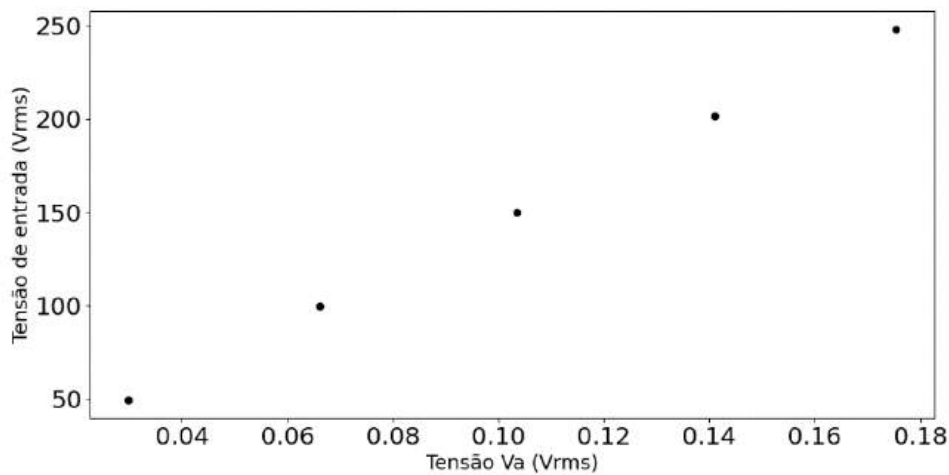


Figura 40 – Relação entre a tensão de entrada e a tensão  $V_{divV}$  do divisor de tensão capacitivo

## 4.2 Ensaios com os isoladores contaminados

Como detalhado anteriormente, foram realizadas duas etapas dos ensaios com os isoladores contaminados naturalmente. A primeira etapa consistiu em avaliar os isoladores poluídos naturalmente conforme foram retirados de operação da linha de transmissão. A segunda etapa avaliou os isoladores com uma camada de umidade aplicada artificialmente

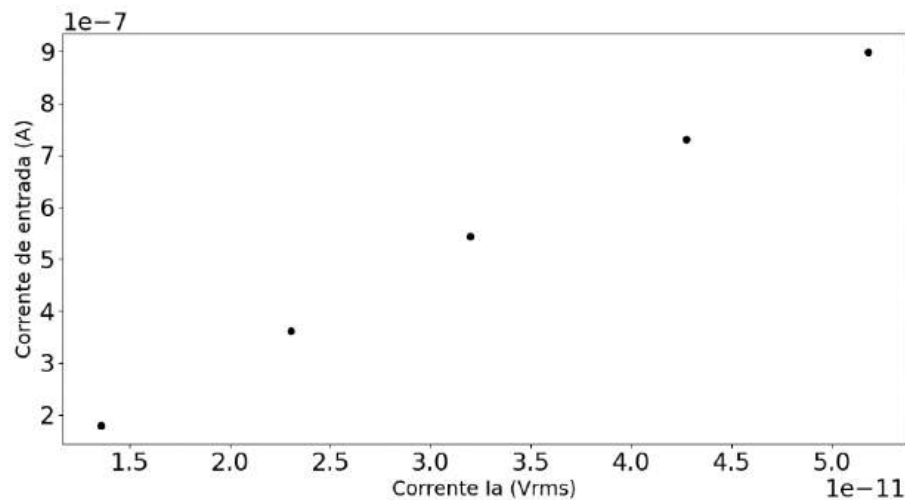


Figura 41 – Relação entre a corrente de entrada e a corrente  $I_a$  do divisor de tensão resistivo com tensão  $V_{divR}$

sobre a camada de poluição natural. Esta etapa do experimento teve como objetivo avaliar o desempenho dos isoladores em um ambiente úmido, tendo em vista que a umidade facilita o processo de deposição de contaminantes e a ocorrência de descargas parciais.

Além disso, vale ressaltar que processo de umidificação natural dos isoladores pode ocorrer de duas formas: este processo pode ser intenso, ocasionado por chuvas, por exemplo, promovendo a remoção da camada de poluição do isolador; este processo também pode ser de baixa intensidade, apenas umidificando a superfície do isolador, sem no entanto, retirar poluentes. No segundo caso, a camada de água ao invés de remover os poluentes, contribui para a ocorrência de descargas parciais na superfície do isolador. Desta forma, verifica-se a importância de avaliar os isoladores em condições secas e úmidas.

#### 4.2.1 Isoladores contaminados naturalmente e secos

Nesta etapa de ensaios, os isoladores foram utilizados com a contaminação natural que foi depositada ao longo de um ano durante a sua operação em uma LT de 500 kV, localizada em uma região litorânea. A Figura 42 a seguir apresenta um dos isoladores utilizados no ensaio, o isolador em questão é o isolador número 24, o último da cadeia. A partir da imagem é possível observar que o depósito de sujidades ocorre de modo não uniforme, sendo que a poluição é mais pronunciada em um dos lados do isolador. Além disso, a partir da Figura 43, nota-se que a concentração de poluição nesse isolador é maior em sua parte inferior. Ressalta-se ainda que, para cada um dos 24 isoladores retirados da LT, o depósito de poluição ocorreu de maneira diferente, devido à sua posição na cadeia de isoladores, o que leva à comportamentos diferentes durante os ensaios.

Para os ensaios, os isoladores foram conectados ao circuito elétrico apresentado anteriormente na Figura 37. Para sua conexão, os isoladores foram posicionados entre



Figura 42 – Isolador nº 24 da cadeia de isoladores contaminado naturalmente – Parte superior



Figura 43 – Isolador nº 24 da cadeia de isoladores contaminado naturalmente – Parte inferior

o divisor de tensão resistivo e o capacitivo, detalhes do encaixe do capacitor podem ser observados na [Figura 37](#). Na configuração do circuito, o isolador recebe uma tensão que pode ser medida entre os divisores de tensão capacitivo e resistivo, enquanto sua corrente

pode ser obtida a partir da medição feita no divisor de tensão resistivo. O experimento seguiu as seguintes etapas de execução:

- Conectar o isolador ao circuito;
- Ligar a fonte de tensão do transformador regulador e controlar seu valor através da unidade de controle;
- Incrementar a tensão de saída do transformador regulador dentro do intervalo de 50 V – 160 V. Os incrementos foram feitos com o passos de 10 V;
- Para cada valor de tensão considerado, aquistar as formas de onda de tensão provenientes dos divisores de tensão capacitivo e resistivo utilizando o osciloscópio. Como foi realizada a calibração prévia do circuito, as formas de onda são obtidas já em suas escalas e unidades correspondentes.

Para todos os isoladores ensaiados, verificou-se a ocorrência de descargas parciais conforme a tensão de entrada era incrementada; esta ocorrência se tornou ainda mais significativa para valores de tensão na faixa de 110 V – 160 V, na parte de baixa tensão. Para alguns isoladores específicos, que mesmo submetidos à valores elevados de tensão, não apresentaram a ocorrência significativa de descargas, as medições foram realizadas para uma tensão de até 180 V.

Para a posterior análise dos resultados, foi necessária a caracterização do circuito completo. Por este motivo, antes do início das medições utilizando os isoladores, o circuito completo, considerando os dois transformadores de teste e os dois divisores de tensão, teve seus parâmetros aferidos para que estes pudessem ser avaliados posteriormente. O procedimento seguiu os passos descritos anteriormente e, a partir das medições das curvas de tensão e corrente, foi possível obter os valores de resistência e reatância para o circuito. Estes resultados são apresentados nos gráficos das Figuras 44 e 45. Os valores apresentados em tais gráficos são referentes a resistência e reatância obtidos para o divisor de tensão resistivo, que pode ser representado eletricamente pelo circuito equivalente mostrado na Figura 46.

Com base nos gráficos, nota-se que existe um ponto de inflexão para as impedâncias conforme a tensão aumenta, este ponto de inflexão pode ser caracterizado pelo valor de tensão a partir do qual tem-se a ocorrência de descargas parciais no circuito.

#### 4.2.2 Isoladores contaminados naturalmente e com umidade artificial

Nesta etapa dos ensaios verificou-se o comportamento elétrico dos isoladores quando esses são submetidos à diferentes níveis de tensão em uma região que contém névoa capaz de umidificar suas superfícies. Para isso, os isoladores foram umidificados artificialmente

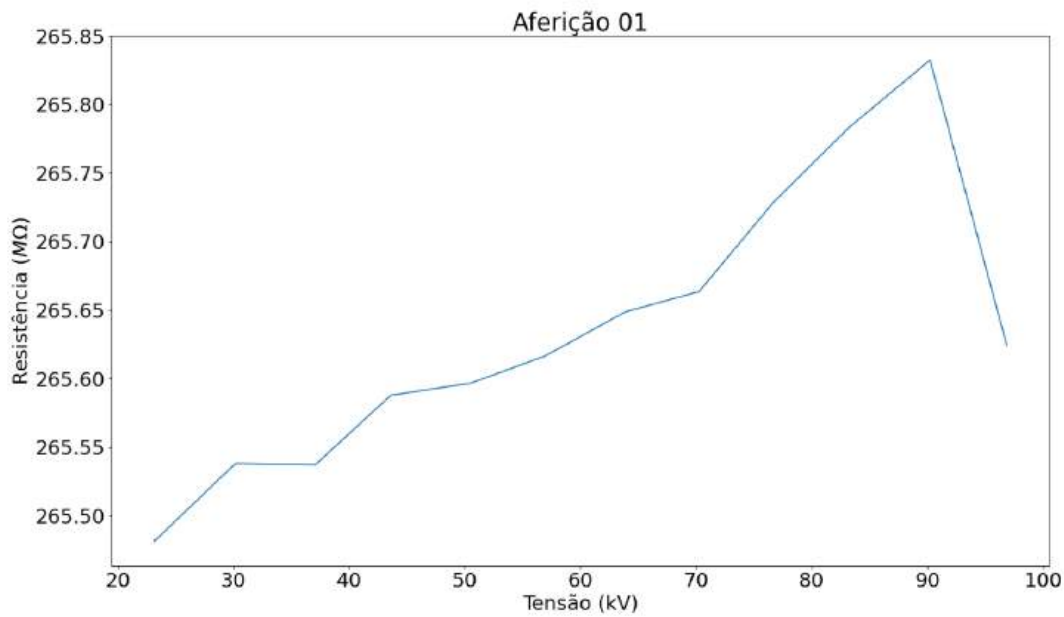


Figura 44 – Relação entre a resistência e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e secos

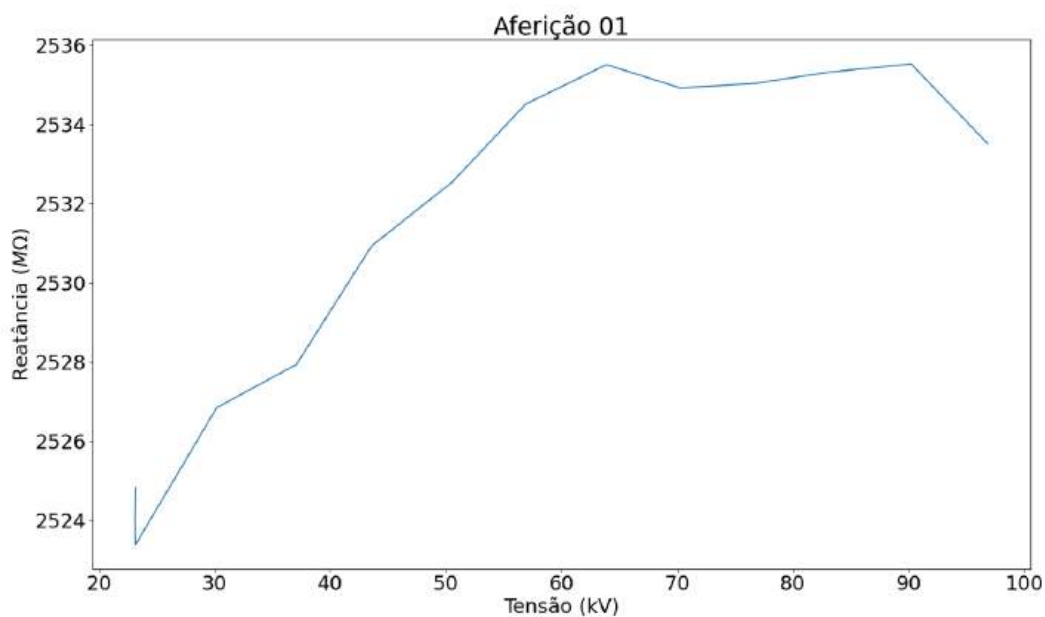


Figura 45 – Relação entre a reatância e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e secos

utilizando um borrifador com água, apresentado na [Figura 47](#). O procedimento de umidificação dos isoladores seguiu um padrão, de forma a garantir que todos os isoladores recebessem uma quantidade de água equivalente. Para isso, foram efetuadas cinco borrifadas na superfície superior de cada isolador e cinco borrifadas na superfície inferior – para cada borrifada a posição do borrifador foi variada em torno do isolador para garantir um



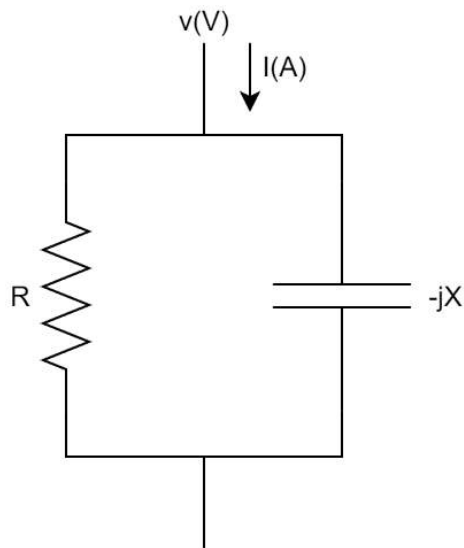


Figura 46 – Circuito elétrico equivalente do divisor de tensão resistivo

depósito uniforme de umidade. A [Figura 47](#) apresenta a superfície umidificada do isolador 24.



Figura 47 – Borrifador utilizado no experimento e superfície do isolador 24 umidificada

Nesses ensaios, foi utilizada a mesma metodologia seguida anteriormente, para os isoladores sem umidade artificial. Todavia, para esses ensaios foi verificada uma maior tolerância dos isoladores para valores elevados de tensão, de forma que não era verificada a ocorrência significativa de descargas parciais até valores de tensão superiores à 160 V, no lado de baixa tensão. Por esse motivo, o intervalo de medição foi alterado para 50 V – 190 V. Após tal ajuste, a obtenção das formas de onda foi feita conforme descrito anteriormente.

Além disso, ao atingir o valor de 190 V, os isoladores foram mantidos sob esta tensão pelo período de 1 minuto. Durante este período, foi possível observar o aumento da ocorrência de descargas parciais, cujas emissões acústicas se tornavam mais pronunciadas

com o decorrer do tempo. Após o fim do intervalo de 1 minuto, as formas de onda eram aquisitadas novamente para verificar o comportamento do isolador após ser submetido à uma alta tensão por um período maior. Assim como feito para os isoladores secos e sujos, o circuito sem isoladores teve novamente seus parâmetros aferidos, retornando os gráficos das Figuras 48 e 49 calculados para suas impedâncias.

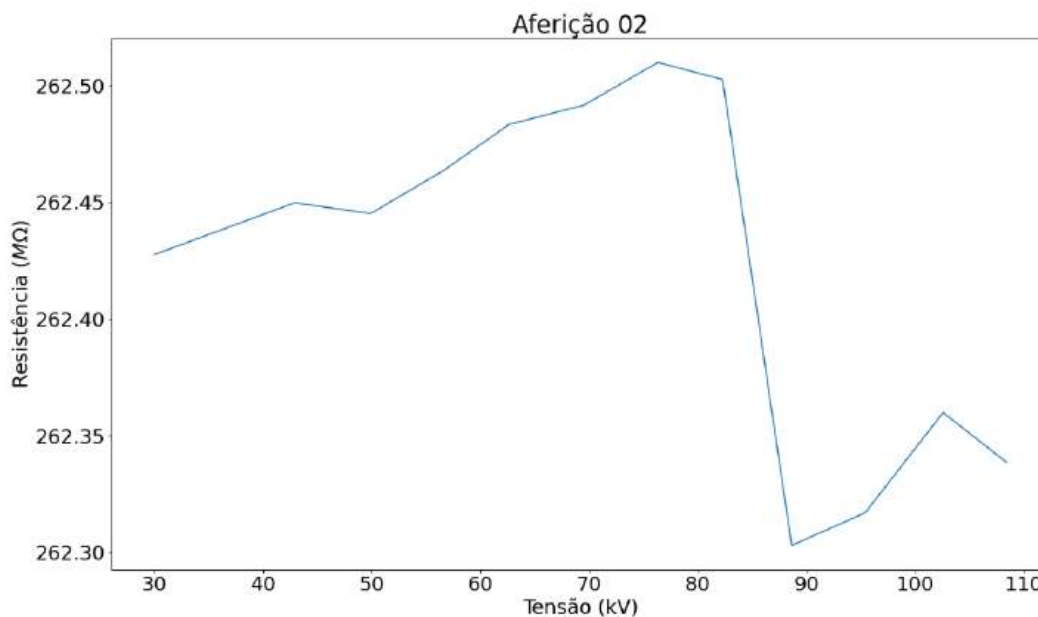


Figura 48 – Relação entre a resistência e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e úmidos

O comportamento observado nas Figuras 48 e 49 para os novos ensaios de aferição do circuito são equivalentes aos obtidos anteriormente (apresentados nas Figuras 44 e 45).

### 4.3 Ensaios com os isoladores limpos

Após os ensaios realizados com os isoladores contaminados, cada um dos isoladores foi limpo seguindo as especificações previstas em norma. Desta forma, os contaminantes de cada isolador foram coletados para serem mensurados e analisados quimicamente. Conforme ressaltado anteriormente, os resultados provenientes da análise química dos contaminantes não faz parte do escopo deste estudo.

Os experimentos considerando os isoladores com sua superfície limpa e seca foram realizados seguindo os mesmos passos apresentados anteriormente. Desta forma, primeiramente os isoladores limpos e secos foram avaliados seguindo o passo a passo apresentado na [subseção 4.2.1](#). Em seguida, os isoladores limpos receberam uma camada de umidade artificial, aplicada da mesma forma na qual foi realizada para os isoladores poluídos. As medições realizadas para os isoladores limpos e com umidade seguiu os mesmos passos apresentados na [subseção 4.2.2](#).

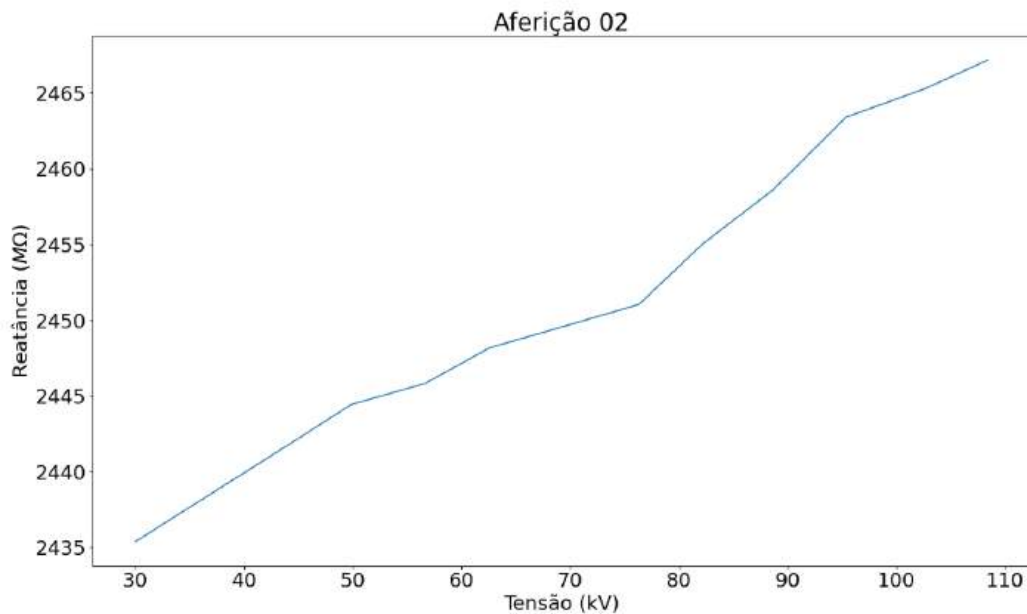


Figura 49 – Relação entre a reatância e a tensão do circuito de ensaios CA para o circuito de testes dos isoladores sujos e úmidos

#### 4.4 Obtenção dos resultados dos ensaios elétricos com os isoladores

##### 4.4.1 Obtenção dos resultados

Para a análise dos resultados, quatro informações principais foram consideradas:

- A impedância dos isoladores;
- A corrente de fuga percorrendo os isoladores;
- A tensão dos isoladores;
- A quantidade de descargas parciais ocorrendo nos isoladores.

Essas informações foram calculadas em conjunto a partir dos dados de tensão e corrente obtidos durante os ensaios com os isoladores. Para a obtenção das três primeiras informações, inicialmente foram considerados os dados de tensão e corrente medidos durante o processo de aferição do circuito sem os isoladores. Como dito anteriormente, essas formas de onda foram obtidas pelo divisor capacitivo e pelo resistivo, respectivamente, em um circuito equivalente ao apresentado na [Figura 50](#).

O processamento dessas formas de onda foi realizado considerando a fundamental de 60 Hz. Nesta análise, observou-se um desvio do ângulo do fasor da tensão, o que indica que a frequência deve ser compensada. Essa compensação é necessária para que a decomposição de Fourier possa ser ajustada na frequência do ensaio. Após o ajuste, as componentes de

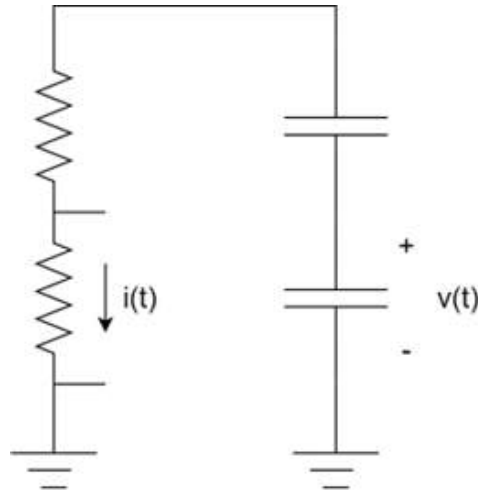


Figura 50 – Esquema de medição das formas de onda de tensão e corrente no sistema de aferição

Fourier puderam ser obtidas utilizando uma janela deslizante e considerando que cada medição tem um total de 500 ms. O cálculo dos coeficientes de Fourier para cada instante de tempo foi feito tanto para a onda de tensão quanto para a de corrente. Considerou-se a obtenção dos fasores da frequência fundamental até a quinquagésima harmônica, todavia, verificou-se que após a vigésima quinta harmônica, não havia variação significativa. Após a decomposição das ondas de tensão e corrente em seus fasores, foi possível calcular a impedância (ou admitância) para cada uma das componentes. Para isso, utilizou-se a seguinte relação básica:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

Essa impedância foi calculada para cada ponto das formas de onda de tensão e corrente. O que retornou diversos valores de  $Z_1$  para cada medição realizada em cada isolador. Desta forma, para se obter o valor representante da impedância para cada medição, foi realizada uma média ponderada pela potência em cada ponto com os valores calculados de  $Z_1$  para cada ponto da forma de onda. Assim, obteve-se uma impedância média do divisor resistivo para cada componente de frequência.

Além disso, devido ao fato de a frequência não ser puramente de 60 Hz, foi realizada uma compensação no cálculo da impedância dos ensaios de aferição (circuito sem isolador). Essa compensação foi realizada na parte imaginária da impedância, considerando a razão direta ou inversa da frequência - dependendo se a impedância possuía uma característica capacitiva ou indutiva, respectivamente. Assim, para cada uma das medições feitas, em cada tensão considerada para o ensaio de aferição, foi obtido um valor de impedância  $Z_w$ . Posteriormente, todas as medições tiveram seus valores de  $Z_w$  ponderados pelo inverso da tensão daquela medição. Dessa forma, criou-se um modelo que prioriza a baixa tensão.

Tabela 3 – Modelo do divisor resistivo

Índice harmônico	Resistência (R)	Reatância (X)
1	261567392,1	-27641177,63
2	267507935,9	-41855412,55
3	277038509	-61343490,27
4	289158677,6	-69100459,9
5	310979679	-78096595,19
6	300293208,2	-77782029,03
7	346476354,3	-80443607,84
8	302392980,3	-48692925,37
9	378459483,4	-109399114,9
10	242036730,1	-29458192,88
11	393303820	-195859820,4
12	207748407	-4125755,846
13	449778761	51395334,65
14	371294566	80751093,74
15	416772938,1	52830539,78
16	365552965,8	60651138,72
17	412757117,2	51595745,69
18	253564885,4	18118868,95
19	388209241,4	59952130,07
20	208459929,9	25913038,73
21	245115166,8	174335779,5
22	175193317,1	-1462330,676
23	112613467,7	-15319087,91
24	147851722,9	678078,9663
25	29283156,55	-2580480,584

A [Tabela 3](#) apresenta os valores corrigidos de impedância média obtidos para o modelo para os diferentes índices harmônicos considerados. A partir dessa tabela foi possível criar um modelo para o divisor resistivo.

A partir da tabela infere-se que no início o modelo do divisor resistivo apresenta um comportamento capacitivo, como era esperado, e o valor calculado para a resistência da frequência fundamental é próximo ao que foi medido diretamente do circuito. Todavia, a partir de uma determinada frequência verifica-se a variação entre o comportamento indutivo e capacitivo para esse divisor. Após a obtenção do modelo do divisor resistivo, foi possível realizar o cálculo da tensão no isolador.

#### 4.4.1.1 Cálculo da tensão nos isoladores

Para obter a tensão nos isoladores considerou-se a tensão total dada pelo divisor capacitivo, pois essa grandeza representa a tensão sob o isolador e o divisor resistivo. Além da forma de onda da tensão, também utilizou-se a corrente medida que percorre o divisor resistivo. Com essas duas medições e com o modelo ajustado da impedância do divisor

resistivo foi possível decompor a corrente em suas componentes harmônicas e calcular a tensão no divisor resistivo. Em seguida calculou-se a diferença entre essa tensão calculada para o divisor resistivo e a tensão medida no divisor capacitivo. Essa diferença representa a tensão no isolador, o esquemático apresentado na [Figura 51](#) exemplifica esta relação.

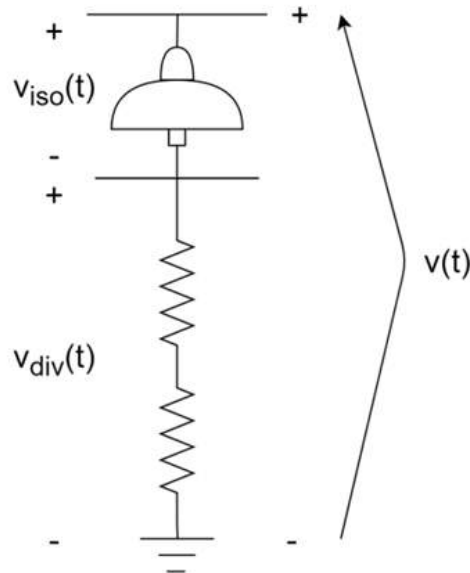


Figura 51 – Esquemático considerado para o cálculo da tensão do isolador.

Desta forma, foi possível obter os valores de tensão no isolador. Além disso, os valores de corrente nesse componente são os mesmos medidos para o divisor de tensão resistivo. As formas de onda de tensão e corrente obtidas para o isolador foram decompostas em componentes harmônicas e, com base nisso, foi possível calcular a impedância de cada isolador. Assim como feito para as medições de aferição, foi realizada uma média ponderada das impedâncias calculadas para cada medição pela potência, obtendo, para cada tensão de ensaio, um valor de impedância. Após obter a impedância para cada ensaio, foi realizada uma média ponderada pelo inverso da tensão com a finalidade de construir um modelo que privilegia a baixa tensão – que consiste no modelo que considera o menor valor de corrente de fuga. Desta forma, foi criado o modelo equivalente de impedância do isolador.

Considerando o vetor de impedâncias e a tensão calculada sobre cada isolador, foi possível calcular a corrente que percorre cada um dos isoladores. Essa corrente é um valor estimado, que foi confrontado com o valor da corrente medida para o ramo do isolador em série com o divisor resistivo. Como o modelo de impedâncias calculado para o isolador privilegiou a baixa tensão, a diferença entre a corrente calculada e a medida tem relação com a corrente de fuga que flui na superfície do isolador.

#### 4.4.1.2 Quantidade de descargas parciais

Para o cálculo das quantidades de descargas parciais nos isoladores, utilizou-se as formas de onda de corrente de fuga calculadas anteriormente. Foi realizada uma

decomposição da corrente de fuga para retirar a parcela relacional da corrente, de forma a deixar os ruídos presentes no sinal, que podem ter relação com a descarga parcial. Dessa forma, a partir da integração apresentada na equação a seguir, realizada sobre o sinal dos ruídos, é obtida a quantidade de coulomb por ciclo relativa à quantidade de carga da descarga parcial.

$$DP = \frac{\int |I_{dif}(t)dt|}{\text{N}^\circ \text{ de ciclos}} \quad (4.1)$$

Onde  $I_{dif}$  representa o sinal de corrente residual, ou seja, o sinal de corrente de fuga relativo ao ruído. Com isso, é possível caracterizar o comportamento da descarga parcial para os isoladores secos e úmidos.

## 4.5 Análise dos resultados dos ensaios elétricos com os isoladores

### 4.5.1 Resultados dos ensaios com isoladores contaminados naturalmente

Assim como apresentado anteriormente, a partir da obtenção das formas de onda de tensão e corrente do circuito CA com os isoladores conectados, foi possível obter a impedância equivalente do circuito. Neste caso, para os resultados apresentados, a impedância equivalente inclui tanto a impedância do isolador quanto do divisor resistivo de tensão, como no circuito elétrico apresentado na [Figura 52](#).

O circuito elétrico equivalente apresentado na [Figura 52](#) apresenta uma representação da impedância do isolador  $R_i - jX_i$  em série com a impedância do divisor de tensão resistivo  $R - jX$ . Para esse circuito, os valores de resistência e reatância encontrados para cada um dos isoladores são apresentados nos gráficos apresentados no [Apêndice A](#).

A partir dos gráficos é possível observar que, conforme o valor da tensão de entrada do circuito aumenta, a resistência também tende a aumentar até um certo ponto, isso ocorre devido a existência de colisões eletrônicas. Todavia, a partir de certo ponto, é possível observar, para alguns isoladores, que há uma queda na resistência, o que indica, conseqüentemente, um aumento na corrente. Esta corrente tem origem eletrônica e percorre a superfície do isolador. A partir do ponto de queda da resistência, também se infere a ocorrência de descargas parciais nos isoladores.

#### 4.5.1.1 Resultados dos ensaios com isoladores contaminados naturalmente e com umidade artificial

Os resultados obtidos para os isoladores contaminados naturalmente e umidificados artificialmente foram compilados utilizando os mesmos critérios apresentados anteriormente. Desta forma, os valores de impedância apresentados nos gráficos dos resultados também são caracterizados pelo circuito apresentado na [Figura 52](#). Os resultados para esses ensaios são apresentados no [Apêndice B](#).

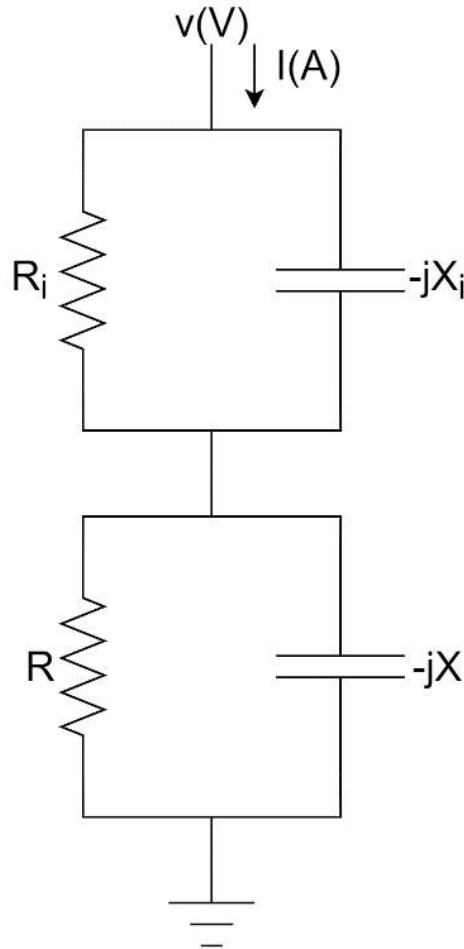


Figura 52 – Circuito elétrico equivalente representando a impedância obtida do isolador em série com o divisor de tensão resistivo

A partir dos gráficos encontrados no [Apêndice B](#), nota-se que para os isoladores umidificados, o comportamento da resistência é diferente do observado anteriormente. Com o aumento da tensão é possível notar a queda da resistência durante toda a extensão do gráfico, até um ponto de inflexão onde há um aumento da resistência. O oposto ocorre com a reatância, que aumenta ao longo do gráfico junto com a tensão e que apresenta uma queda do valor para a última medição. Ressalta-se ainda que para esses gráficos, duas medições foram feitas para o último valor de tensão considerado. Por este motivo, existe a mudança abrupta de valor para as variáveis de resistência e reatância para este último valor de tensão. Nota-se ainda que, devido às duas medições feitas com a diferença de 1 minuto entre uma e outra, é possível observar um aumento expressivo na resistência após esse intervalo temporal e uma redução significativa na reatância.

#### 4.5.2 Resultados sobre os dados de corrente de fuga

Os resultados apresentando os valores calculados para corrente de fuga nos isoladores são apresentados no [Apêndice C](#). Esses resultados foram obtidos conforme as análises computacionais descritas anteriormente e representam o comportamento da corrente de



fuga para cada isolador nas duas situações consideradas – isoladores secos e isoladores molhados. A análise do comportamento desses gráficos e da corrente de fuga no geral é apresentada na próxima seção.

#### 4.5.3 Resultados sobre os dados de quantidade de descargas parciais

O [Apêndice D](#) apresenta os gráficos obtidos para a quantidade de descargas parciais calculadas para cada um dos isoladores em condições secas e úmidas. Assim como os gráficos apresentados nos outros anexos, esses resultados foram obtidos conforme as análises computacionais descritas anteriormente. A análise do comportamento desses gráficos é apresentada na próxima seção.

### 4.6 Análise dos resultados dos ensaios elétricos

#### 4.6.1 Impedância dos isoladores

A fim de realizar uma análise comparativa entre os valores das resistências e reatâncias do circuito para os diferentes isoladores, em condições secas e úmidas, a [Tabela 4](#) e os gráficos das [Figuras 53 e 54](#) foram criados. Os valores considerados foram arbitrariamente obtidos para a décima medição dos ensaios, correspondente à uma tensão de entrada de aproximadamente 89 kV.

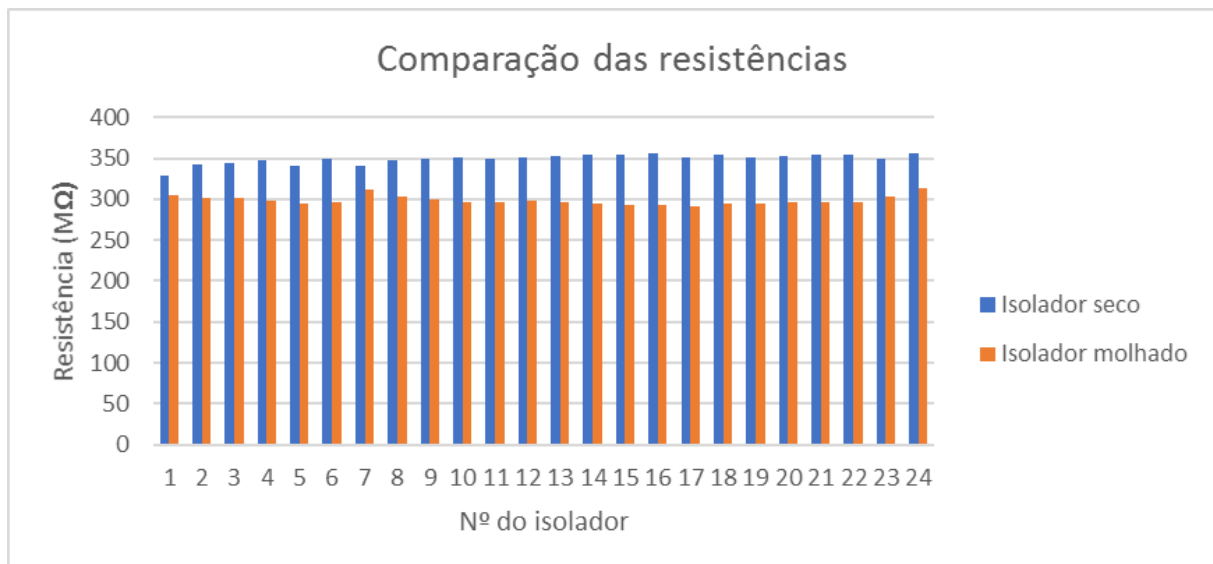


Figura 53 – Comparação entre os valores de resistência do circuito para os isoladores em diferentes condições

A partir da análise dos gráficos é possível observar que não há alterações significativas de resistência para os diferentes isoladores da cadeia. Além disso, a diferença entre os valores de resistência obtidos para isoladores secos e isoladores molhados também é pequena. Todavia, para a reatância, observa-se uma distinção visível entre os valores obtidos para diferentes isoladores durante a análise de isoladores secos. Esta mesma situação não

Tabela 4 – Comparação entre os valores de resistência e reatância do circuito para os isoladores em diferentes condições

Isolador	Isolador seco		Isolador molhado	
	Resistência (M $\Omega$ )	Reatância (M $\Omega$ )	Resistência (M $\Omega$ )	Reatância (M $\Omega$ )
1	328,7162	9596,053	304,1645	3757,711
2	342,0148	10384,24	301,011	4006,838
3	344,5659	10200,84	300,6349	4356,205
4	348,0525	15590,38	298,5249	3821,699
5	340,7436	8533,121	295,3535	3872,807
6	348,6145	9328,414	296,9791	3815,028
7	341,0316	6933,87	310,9138	3015,692
8	346,7385	12191,02	303,0759	3312,131
9	349,4148	12794,79	299,9779	3366,556
10	351,6731	19077,62	296,3945	3968,169
11	349,4012	9569,524	296,9414	4029,997
12	351,011	15101,39	298,2249	3495,134
13	353,0896	14708,59	295,4675	3854,818
14	354,1267	23379,66	294,9864	3921,644
15	354,1764	22997,35	293,4956	3915,771
16	355,4826	28488,2	293,1988	4000,827
17	350,9053	11008,67	291,9165	3953,347
18	354,3577	15381,07	294,4512	4021,84
19	351,4172	11603,94	294,1771	3819,938
20	353,4962	17995,14	295,6652	4056,796
21	353,9939	20216,37	296,9363	4208,668
22	354,0332	27730,98	296,6529	3976,941
23	349,3933	12904,76	303,8	3200,787
24	355,44	50452,51	313,1425	10463,13

é verificada para os isoladores com umidificação artificial, que apresentam uma reatância seguindo um comportamento uniforme. Para comparar estatisticamente as medições, inicialmente foram realizadas análises para verificar a normalidade e homogeneidade das variâncias das medidas de resistência e reatância dos isoladores tanto em condições secas quanto úmidas. As medições não satisfizeram esses critérios, então optou-se pela utilização do teste de Wilcoxon para comparar as medidas entre as duas condições. Os resultados indicaram que não houve variação significativa tanto na resistência quanto na reatância dos isoladores entre as condições secas e úmidas.

#### 4.6.2 Análise da condutância dos isoladores

Para a análise da condutância, foram considerados os valores medidos de corrente nos isoladores (corrente medida no ramo do divisor resistivo) e os valores calculados de tensão para os isoladores. Com esses dados, foi possível calcular a condutância de cada um dos isoladores nas condições de isoladores secos e úmidos.

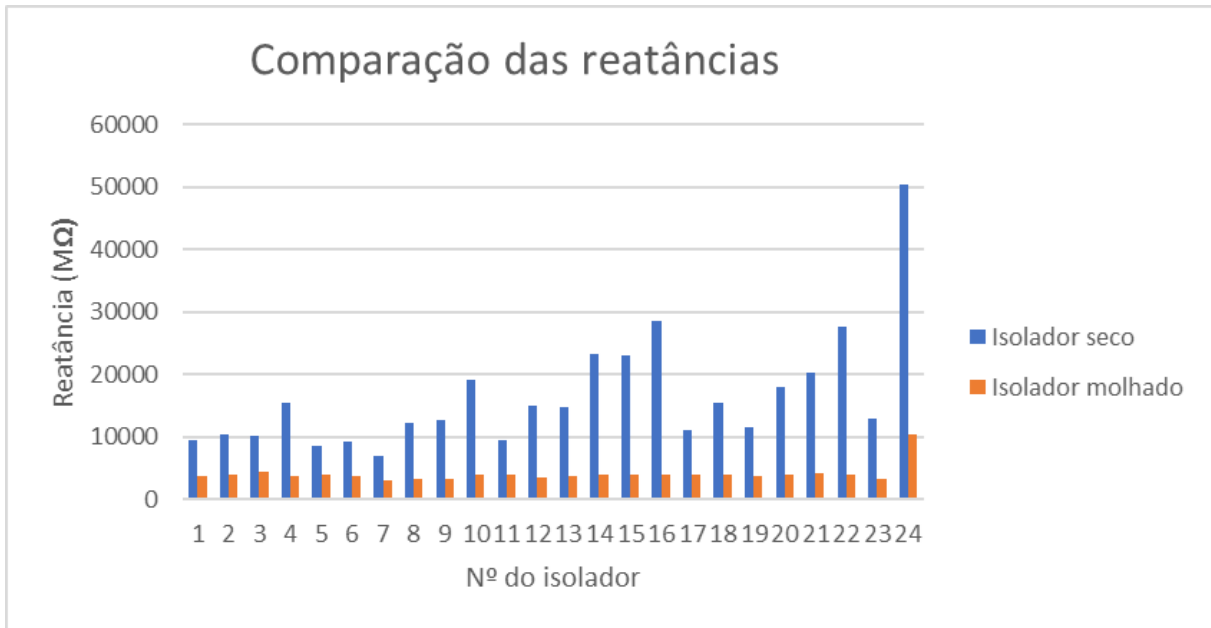


Figura 54 – Comparação entre os valores de reatância do circuito para os isoladores em diferentes condições

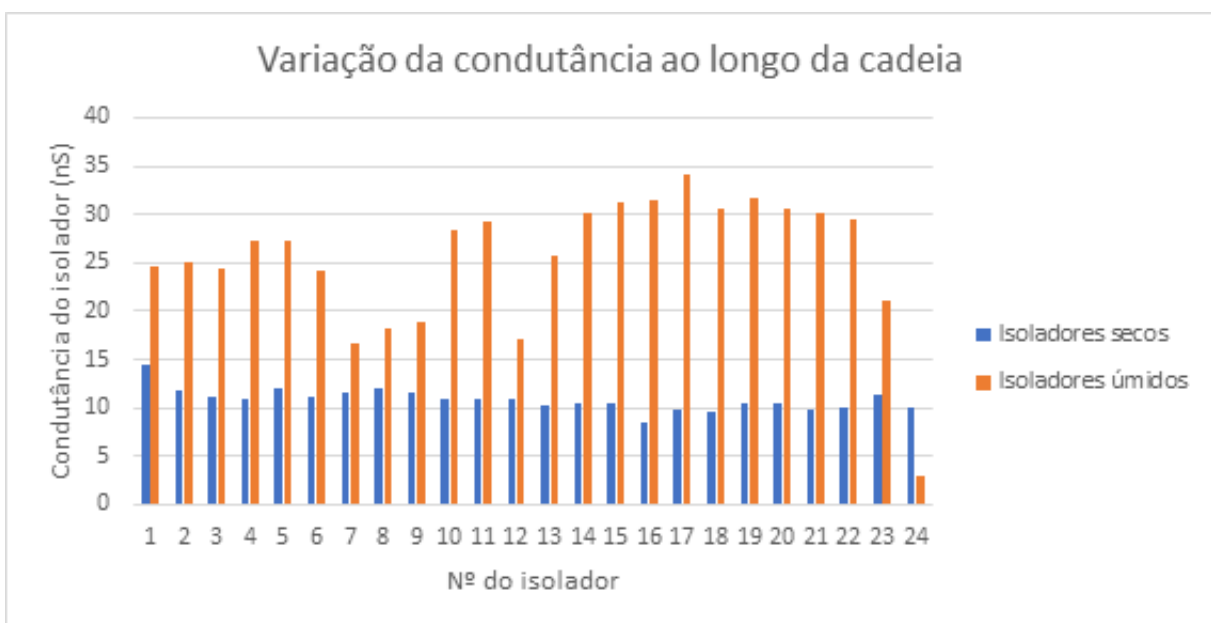


Figura 55 – Comparação da condutância dos isoladores em condições com e sem umidade.

Observa-se a partir da [Tabela 5](#) e da [Figura 55](#), que o valor da condutância é visivelmente maior para quase todos os isoladores quando umidificados artificialmente. Essa situação só não é verificada para o isolador 24, o isolador mais próximo à torre da LT. Foi realizada uma análise estatística similar àquela realizada para avaliar a resistência e a reatância dos isoladores, neste caso para avaliar a condutância desses equipamentos. Nesta análise, foi aplicado o teste de Wilcoxon para verificar se há similaridade entre as medições nas condições secas e úmidas. Os resultados revelaram uma alteração estatisticamente significativa nas medições de condutância dos isoladores em ambas as condições. O aumento

Tabela 5 – Valores de condutância calculados para os isoladores

Nº do isolador	Condutância (S)	
	Secos	Úmidos
1	1,43503E-08	2,47162E-08
2	1,17311E-08	2,50332E-08
3	1,11348E-08	2,43957E-08
4	1,09914E-08	2,7321E-08
5	1,19879E-08	2,71757E-08
6	1,10551E-08	2,42456E-08
7	1,14956E-08	1,66774E-08
8	1,19157E-08	1,83077E-08
9	1,15045E-08	1,87912E-08
10	1,09426E-08	2,84052E-08
11	1,08327E-08	2,92757E-08
12	1,08277E-08	1,71232E-08
13	1,02842E-08	2,58242E-08
14	1,05088E-08	3,00774E-08
15	1,0408E-08	3,13337E-08
16	8,50678E-09	3,15201E-08
17	9,71217E-09	3,40291E-08
18	9,54268E-09	3,05404E-08
19	1,05718E-08	3,17683E-08
20	1,04069E-08	3,05199E-08
21	9,84534E-09	3,019E-08
22	9,95931E-09	2,94768E-08
23	1,12588E-08	2,1011E-08
24	9,96633E-09	2,86798E-09

da condutância para os isoladores úmidos indica que uma parcela adicional de corrente passa a percorrer a poluição úmida que está depositada na superfície do isolador. Além disso, observa-se que, para os isoladores em condições secas, esse parâmetro se mantém estável ao longo da cadeia; o contrário ocorre com os isoladores úmidos, cuja condutância apresenta variações ao longo da cadeia de isoladores.

#### 4.6.3 Análise da corrente de fuga dos isoladores

Em relação ao comportamento da corrente de fuga que percorre a superfície dos isoladores, é possível observar nos gráficos apresentados no [Apêndice C](#) que essa variável não segue um comportamento padrão que possa ser facilmente aproximado por uma função conhecida. O comportamento errático da corrente de fuga pode ser justificado pelo fato dessa fluir pela superfície do isolador e sofrer uma influência importante da sujidade depositada.

A sujidade ao longo da superfície do isolador é depositada de maneira desigual, o que induz a formação de certas bandas isolantes no material. Assim, a distribuição da densidade

de corrente de fuga ocorre de maneira desigual e a corrente pode ficar confinada em certas regiões da superfície do isolador devido a distribuição da sujidade. Com a distribuição desigual da corrente, ocorrem alterações em certas regiões na superfície do material. Dessa forma, haverão regiões nas quais a corrente circulava mas, devido à alteração do material que leva à um aumento da resistência, ocorre a diminuição da corrente nessa região. Conforme a tensão é aumentada ao longo dos ensaios, outros pontos que não estavam conduzindo, passam a conduzir, o que é caracterizado pelo aumento da corrente.

Por esses motivos, o comportamento aparentemente instável da corrente de fuga tem relação com a alteração da condutância superficial em função da própria passagem da corrente. Por fim, ressalta-se que, com base na análise dos gráficos do [Apêndice C](#), é possível observar que o nível da corrente de fuga é significativamente maior para os isoladores úmidos em relação aos mesmos isoladores em condições secas.

#### 4.6.4 Análise da quantidade de descargas parciais nos isoladores

As descargas parciais ocorrem devido à alterações que aconteceram no sistema. Tais alterações podem ser decorrentes de uma deterioração da isolação, causada pelo envelhecimento ou por causa de algum problema externo. Esse fenômeno é decorrente de uma corrente impulsiva e de curta duração que não se sustenta. Com base nos gráficos apresentados no [Apêndice D](#), nota-se que a quantidade de descargas parciais calculada segue um comportamento que pode ser aproximado por uma exponencial para a maioria dos isoladores. Além disso, observa-se que, para alguns isoladores, o nível das descargas é maior para os isoladores secos, enquanto para outros, o oposto acontece. Todavia, como é possível ver na [Figura 56](#), para 18 dos 24 isoladores, a quantidade média de descargas parciais é maior para os isoladores na condição úmida.

#### 4.6.5 Análise da variação da corrente de fuga e da quantidade de descargas parciais nos isoladores

As taxas de variação foram calculadas considerando a tensão de cada isolador e são apresentadas nas [Figuras 57 e 58](#).

A taxa de variação dessas grandezas indica o quanto elas cresceram ou diminuíram em relação ao aumento da tensão do isolador. Com base nos valores apresentados na tabela e nas figuras, nota-se que para ambas as variáveis, na maioria dos casos, há uma maior variação para os isoladores em condições úmidas, o que era esperado devido ao fato de o isolador em condições úmidas permitir uma maior passagem de corrente de fuga e devido ao processo de medição que submeteu os isoladores úmidos à uma tensão elevada durante um intervalo de tempo maior do que o considerado para os outros ensaios. Além disso, pode-se inferir que o isolador com maior resiliência frente às alterações, é o isolador número 1, que apresentou a menor média de variação para ambas as grandezas analisadas.

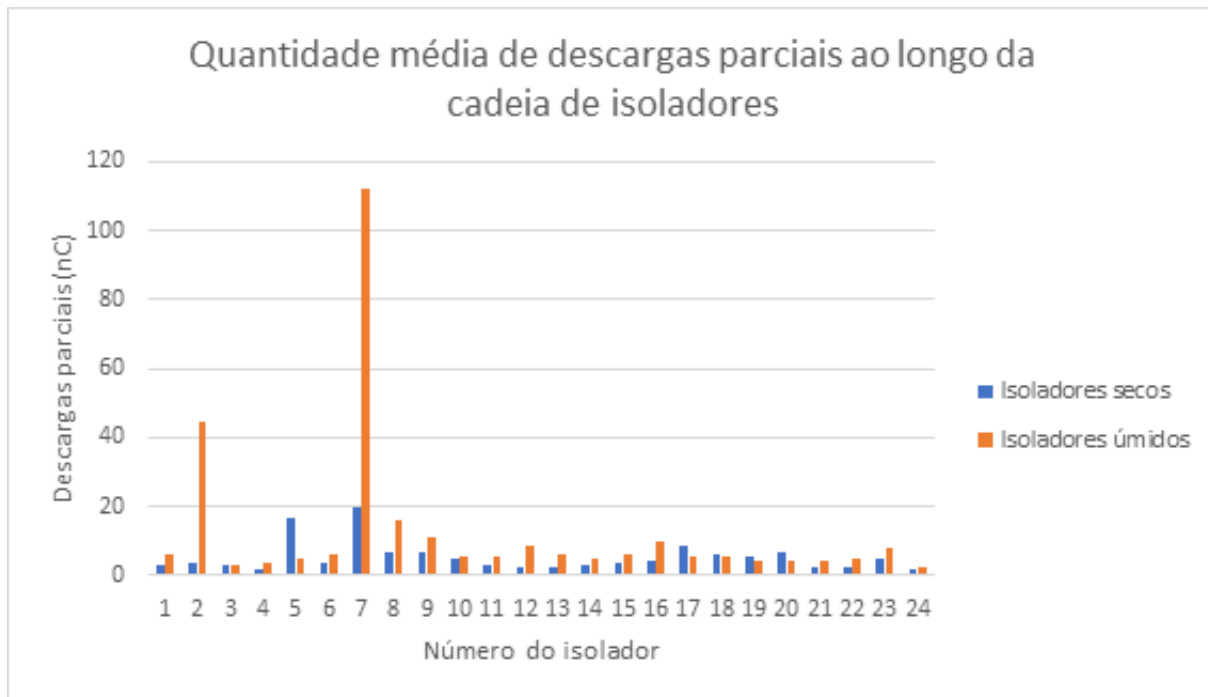


Figura 56 – Quantidade média de descargas parciais para os isoladores em condições com e sem umidade artificial.

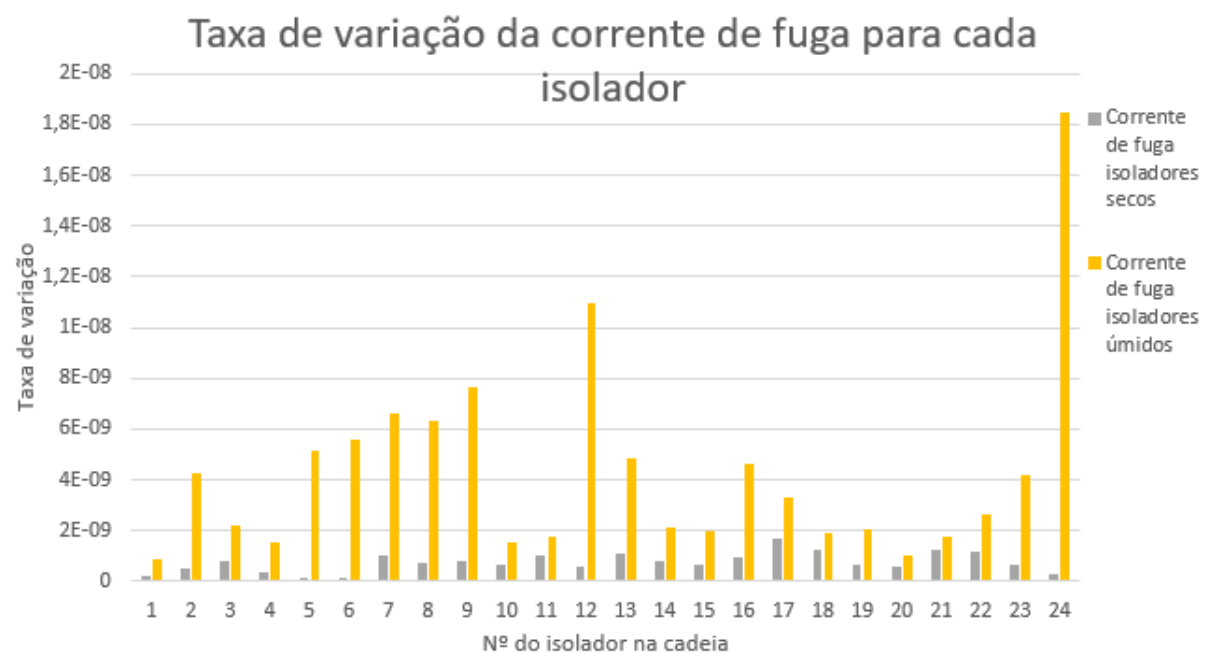


Figura 57 – Taxa de variação da quantidade de corrente de fuga para cada isolador

#### 4.6.6 Comparação dos resultados com os isoladores limpos

Em relação aos ensaios realizados com os isoladores limpos, a impedância de cada isolador foi calculada seguindo a metodologia apresentada anteriormente. Os resultados para as impedâncias calculadas para os isoladores limpos e secos e limpos e úmidos são apresentados nas Figuras 59 e 60, respectivamente. Para fins comparativos, gráficos

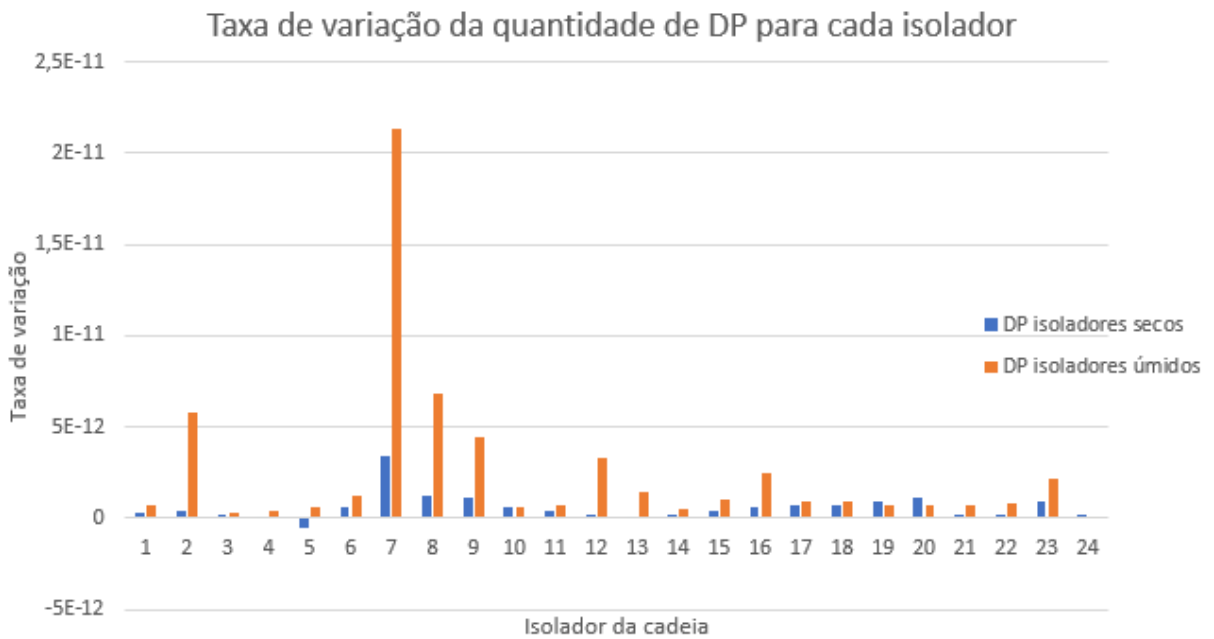


Figura 58 – Taxa de variação da quantidade de DP para cada isolador

similares foram criados para os isoladores contaminados secos e úmidos, apresentados nas Figuras 61 e 62, respectivamente.

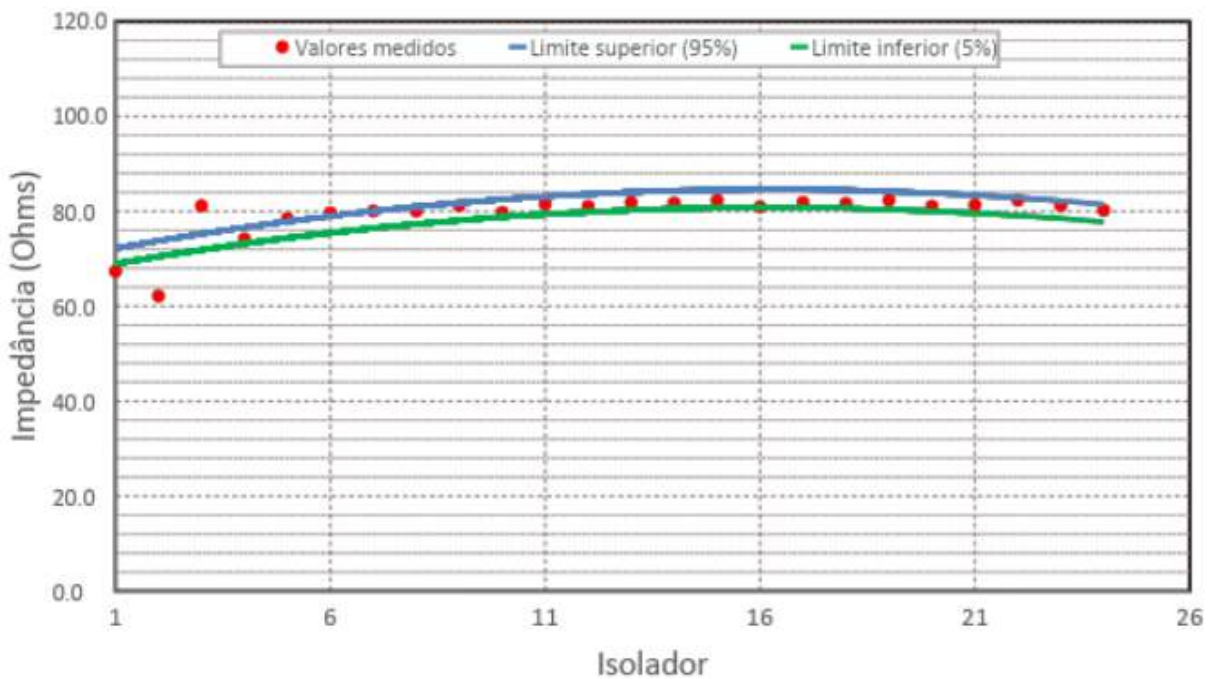


Figura 59 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores limpos e secos

Com base nas Figuras 59 e 60, que mostram o comportamento dos isoladores após a limpeza, observa-se que sua performance continua comprometida quando expostos à umidade artificial, mesmo após a remoção da sujeira da superfície. Isso sugere que

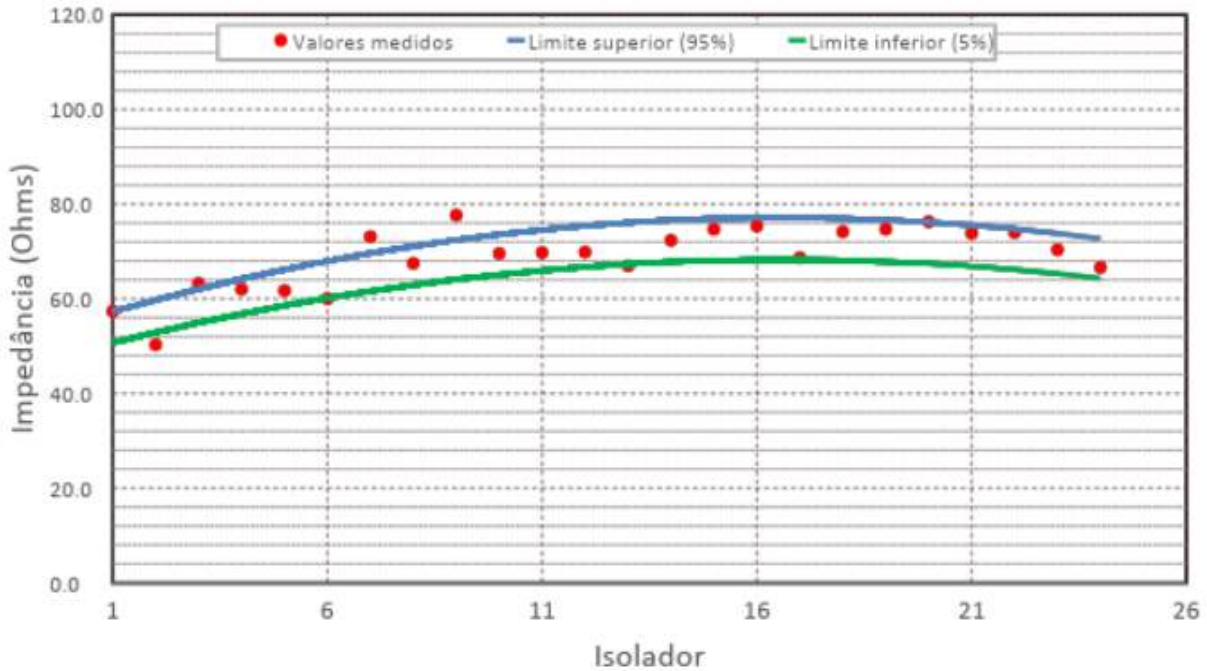


Figura 60 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores limpos e úmidos

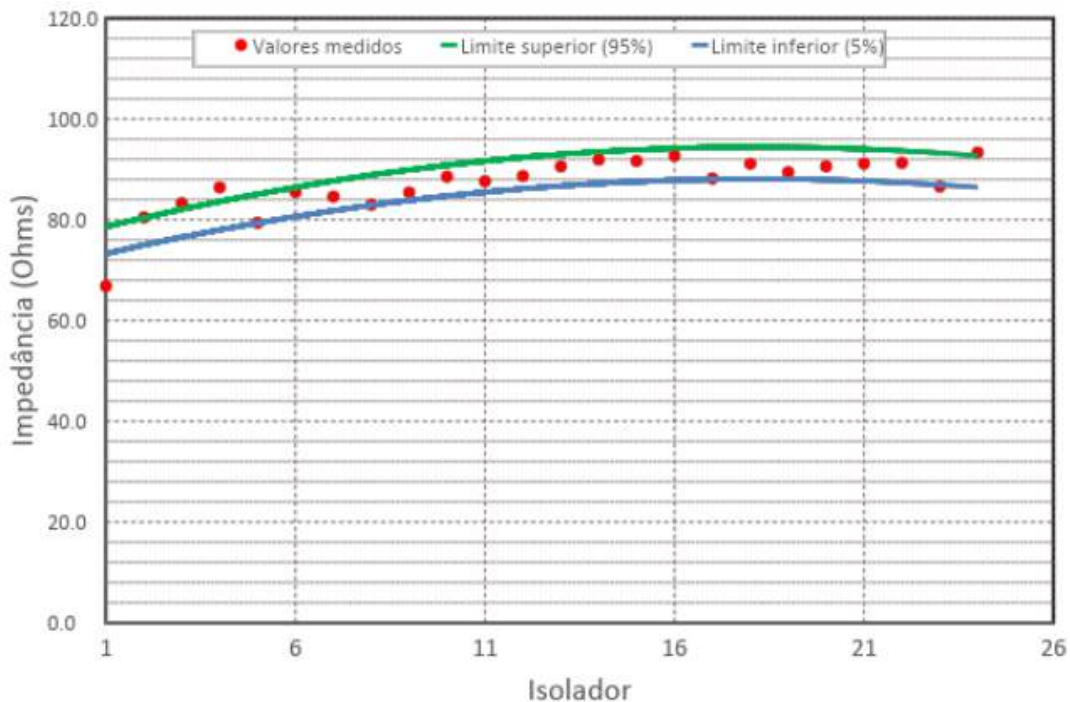


Figura 61 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores sujos e secos

a presença persistente de uma camada de contaminantes na superfície dos isoladores altera suas características superficiais, afetando seu desempenho mesmo após a limpeza. Essa mudança nas características superficiais é evidenciada pelo fato de que, quando os isoladores limpos são expostos à umidade artificial, sua impedância é reduzida, assim como



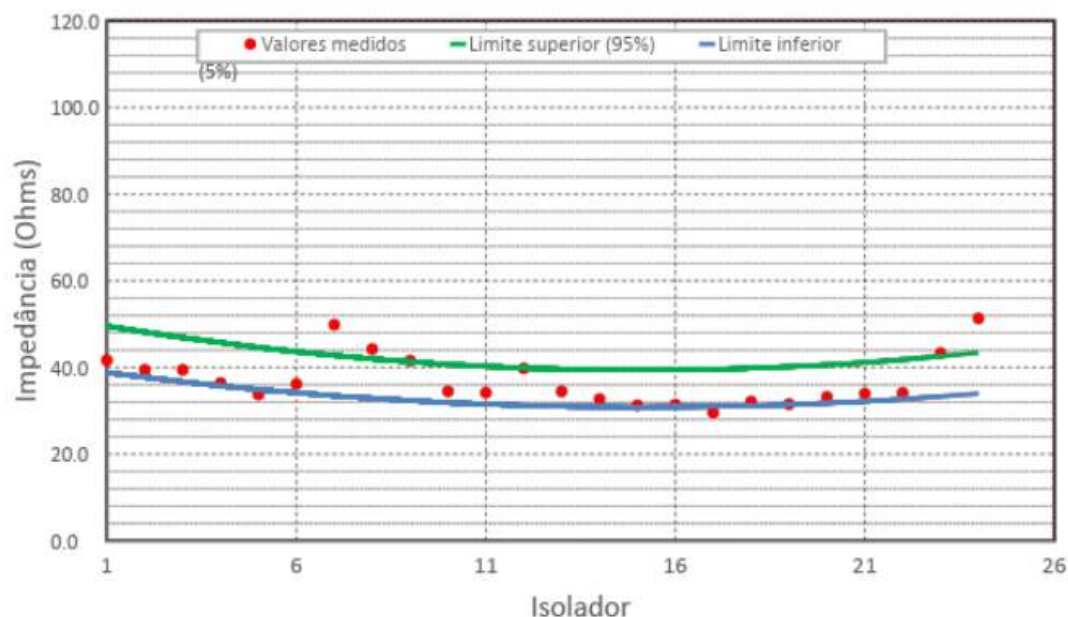


Figura 62 – Resultados dos ensaios elétricos – Cálculo da impedância para os isoladores sujos e úmidos

ocorre com os isoladores contaminados.

O grau de degradação apresentado no comportamento dos isoladores, pode ser ocasionado pelos seguintes fatores: erosão superficial ocasionada pelo processo de deposição de contaminantes; ocorrência de descargas parciais na superfície dos isoladores. Além disso, a partir dos gráficos, nota-se que há um grau de variação significativo do funcionamento dos isoladores ao longo da cadeia, de forma que, os isoladores das extremidades apresentam um comportamento com maior nível de deterioração que os isoladores do centro da cadeia.

#### 4.7 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os ensaios laboratoriais de alta tensão que foram realizados utilizando isoladores naturalmente contaminados a fim de verificar a performance de tais elementos após um período de exposição a um ambiente severo em termos de poluição. A partir dos resultados, foi possível inferir que, quando sujeitos à umidificação superficial, os isoladores apresentam uma degradação no desempenho elétrico mesmo após a remoção da camada de contaminantes. Esta degradação pode estar relacionada com os mecanismos de deposição de contaminantes na superfície dos isoladores e com a ocorrência de descargas parciais, dois processos que podem acarretar em danos superficiais aos equipamentos.

Ressalta-se ainda a contribuição promovida pelo estudo ao utilizar isoladores naturalmente poluídos, pois, conforme visto no [Capítulo 2](#), o processo de deposição de contaminantes na superfície dos isoladores é afetado pela presença ou não do campo elétrico, que está presente quando a LT está em operação. Desta forma, ensaios realizados com

isoladores naturalmente poluídos apresentam resultados mais condizentes com a prática do que àqueles obtidos com isoladores contaminados artificialmente.

Por fim, ressalta-se a importância das análises obtidas a partir dos resultados dos ensaios laboratoriais, que destacam os impactos negativos que a poluição causa sobre a performance dos isoladores. Este tipo de informação é de extrema valia e indica a importância de considerar a severidade da poluição no ambiente de operação em estudos de viabilidade de novos empreendimentos e nas análises sobre a vida útil de isoladores de LTs. Devido ao nível significativo de contribuição dos resultados obtidos neste capítulo, destaca-se que estes resultados e análises derivadas já foram publicados em alguns eventos científicos destacados no [seção 1.3](#).

## 5 FILOSOFIA DO MONITOR DE CONDIÇÃO DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO

### 5.1 Desenvolvimento do sistema embarcado

Como destacado no [Capítulo 3](#), um sistema embarcado pode ser definido como um conjunto de partes de hardware e software que interagem de forma a desenvolver uma função ou tarefa específica ([HAMBARDE; VARMA; JHA, 2014](#)).

No caso deste trabalho, o sistema embarcado desenvolvido visa monitorar grandezas ambientais e elétricas nas proximidades do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão, a fim de fornecer informações sobre o nível de degradação do isolamento de tais equipamentos. O sistema de monitoramento desenvolvido realizará duas atividades principais, uma focada na medição e armazenamento de dados sobre as variáveis ambientais e a outra voltada para a medição e armazenamento de dados sobre as características elétricas do sistema de isolamento.

O sistema de monitoramento é composto por um conjunto de elementos sensores localizados próximos aos isoladores e responsáveis por realizar a medição das grandezas e comunicar suas leituras para o microcontrolador. Este último é responsável por transferir os dados medidos via rádio LoRa. Os dados serão enviados para módulos de recepção, localizados nas casas de controle das subestações. Os módulos de recepção são responsáveis por receber os dados via LoRa e transmitir estes dados para uma plataforma de banco de dados, para que posteriormente possam ser analisados e visualizados por clientes e usuários. Na [Figura 63](#) a seguir, é apresentado o esquemático do sistema desenvolvido, detalhando os elementos que o compõe. Nota-se que nos módulos de transmissão e recepção, o elemento principal de processamento é o microcontrolador ESP32.

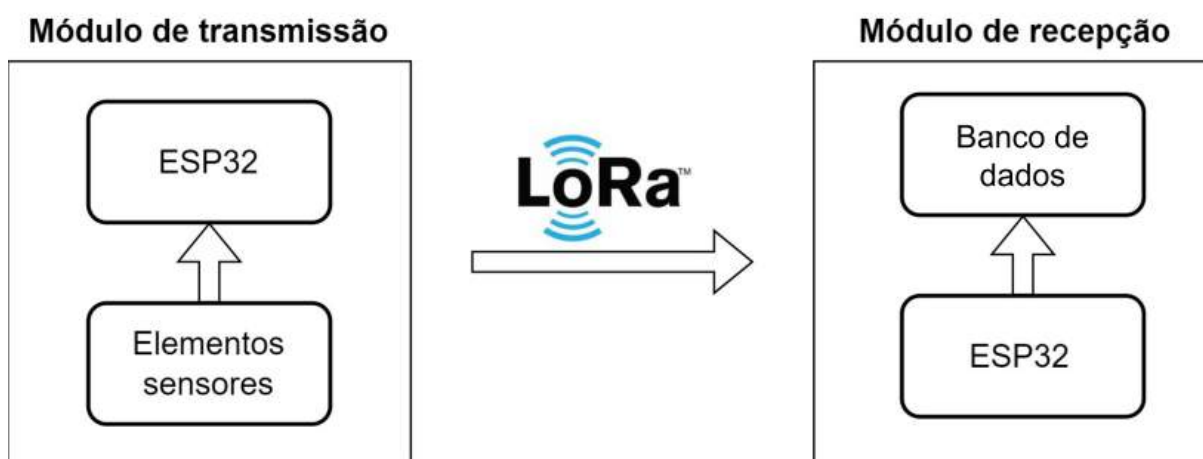


Figura 63 – Esquemático dos módulos de transmissão e recepção de dados propostos

Assim, o projeto propõe a criação de uma rede de sensores baseada em uma comunicação via rede LoRa. Os elementos sensores, localizados próximos aos isoladores na subestação, compõe os nós finais da rede, enquanto que os elementos que recebem e concentram os dados das medições e repassam tais informações para servidores operam como os *gateways* da rede. Desta forma, o sistema desenvolvido pode ser caracterizado como uma rede de comunicação com arquitetura LoRaWAN, conforme apresentado anteriormente na [Figura 13](#).

As seções a seguir apresentam detalhes sobre os elementos selecionados para compor o sistema embarcado proposto.

## 5.2 Sistema de processamento e armazenamento de dados

### 5.2.1 Microcontrolador - ESP32

O microcontrolador ESP32 foi selecionado para ser o elemento central do sistema de monitoramento deste trabalho. Este dispositivo consiste em um microcontrolador desenvolvido pela *Espressif Systems*, usualmente utilizado em aplicações de internet das coisas e redes de sensores, por ser capaz de ajustar seu funcionamento para reduzir o consumo energético, permitindo a otimização entre a comunicação, envio de dados e o consumo de energia ([ESPRESSIF SYSTEMS, 2022](#)).

Os dispositivos da família ESP32 possuem integrados ao chip um módulo de Wi-Fi de 2,4 GHz e um módulo de *Bluetooth*. A integração do módulo de Wi-fi é interessante para o projeto por facilitar a portabilidade dos dados medidos pelo sensor para uma plataforma online disponível para usuários. O processador utilizado nos chips da família ESP32 são do tipo Tensilica Xtensa LX6, estes são processadores de 32 bits e os dispositivos dual core ESP32 contém dois implementados. Em relação as memórias, os dispositivos ESP32 possuem uma memória de programa (memória ROM) de 448 kB e uma memória SRAM de 520 kB ([ESPRESSIF SYSTEMS, 2022](#)).

Dentre os periféricos disponíveis, destacam-se os 18 canais de conversão AD de 12-bits, os 2 conversores D/A de 8 bits, 4 conjuntos de conexões para protocolo SPI, 2 para protocolo I2C, e 3 para protocolo UART. Além disso, o ESP32 possui 48 pinos do tipo GPIO (*General Purpose Input/Output*), que estão divididos em algumas categorias: pinos digitais, pinos com sinal analógico habilitado, entre outros. Os pinos GPIO digitais podem ser configurados como entradas ou saídas, quando configurados como entrada, podem ser associados com interrupções ativadas por borda ou por nível do sinal ([ESPRESSIF SYSTEMS, 2022](#)).

Existem diversos modelos comerciais do ESP32, o modelo escolhido para este trabalho foi o ESP32 LoRa V2 *Heltec* ([Figura 14](#)). Este modelo já possui o radio LoRa integrado no microcontrolador, através do chip SX1276, padronizado para a faixa de

frequência de 863 a 928 MHz. Ressalta-se ainda que seria possível realizar a mesma implementação utilizando um módulo ESP32 simples e um módulo LoRa conectados por uma interface SPI.

### 5.2.2 Concentrador do sistema de monitoramento

Para compor o sistema de recepção de dados, foi utilizado um *desktop* do modelo *Lenovo Thinkcentre Tiny* apresentado na [Figura 64](#), com as seguintes configurações: processador i5, cache de 12 MB, 8 núcleos, RAM de 4GB, armazenamento de 500 GB.



Figura 64 – Modelo de *desktop* utilizado

Este computador foi utilizado conectado ao módulo ESP32 na casa de controle, de forma que o microcontrolador ESP32 recebe pacotes LoRa com a leitura dos sensores e repassa essas informações para o computador através de uma conexão USB. Ressalta-se que outros modelos de computador de igual ou maior capacidade de processamento poderiam ser utilizados. Além disso, pode-se também optar pelo uso de computadores móveis, caso seja um requisito do projeto.

Para o armazenamento dos dados lidos, foi utilizado o banco de dados MariaDB, que consiste em um banco de dados de código aberto e que foi derivado do MySQL, sendo de simples utilização, assim como seu predecessor ([GILFILLAN, 2024](#)). Para o armazenamento dos dados no MariaDB, utiliza-se uma API desenvolvida para a leitura e o salvamento serial como etapa intermediária, conforme apresentado de modo ilustrativo na [Figura 65](#).

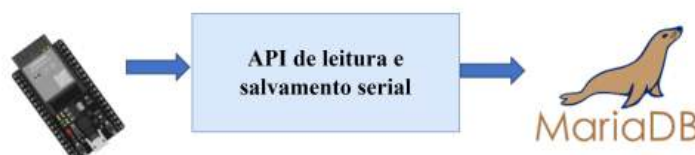


Figura 65 – Esquemático do armazenamento de dados no banco MariaDB

O processo de armazenamento dos dados inicia com o módulo de recepção escrevendo em seu barramento serial o dado recebido como um conjunto de números binários. O processo de escrita no terminal serial consiste em uma comunicação do tipo UART estabelecida entre o módulo ESP32 e o computador. Uma API foi desenvolvida para ler

as informações binárias disponíveis no barramento serial e armazenar essas informações em arquivos binários para o posterior carregamento do banco de dados. A utilização da escrita dos dados recebidos diretamente no barramento serial do computador, utilizando dados do tipo binário, permite uma taxa elevada de transferência de dados, não criando um gargalo no processo de transferência de informações, que poderia ocasionar a perda de leituras dos sensores. Para o desenvolvimento da API, foi utilizado um script em *Python*, visando eficiência computacional. Todavia, outras linguagens de programação também poderiam ser aplicadas. O fluxograma da [Figura 66](#) ilustra o script desenvolvido para o processo de armazenamento de dados.

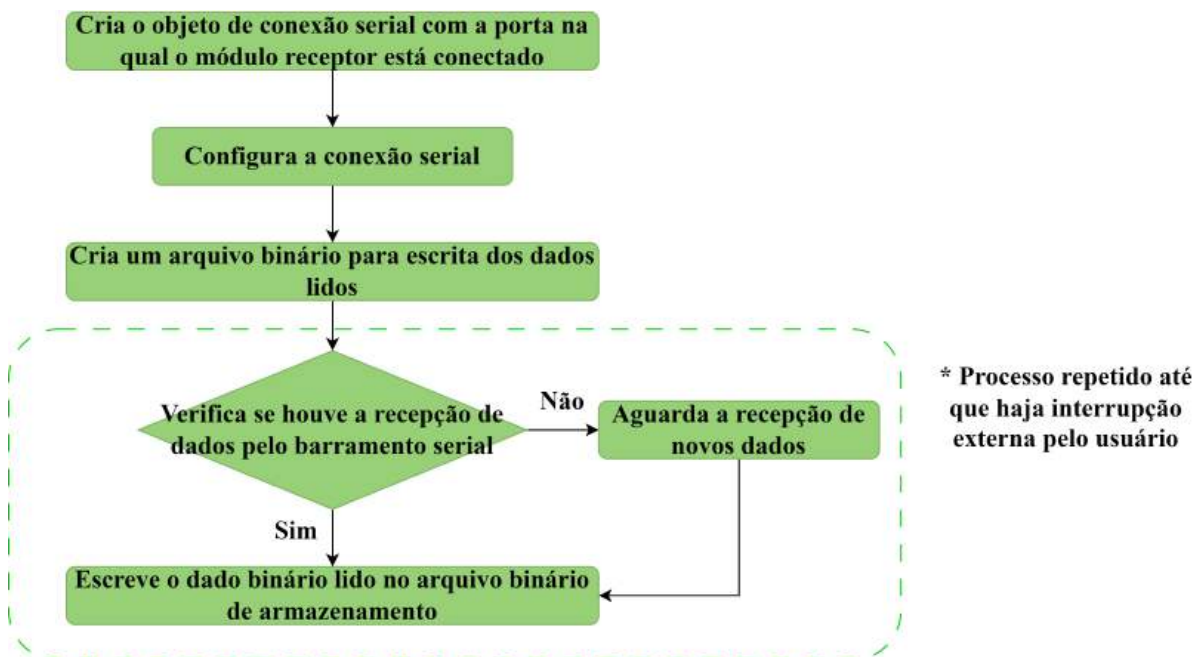


Figura 66 – Software utilizado para conexão serial com o microcontrolador e armazenamento de dados no banco MariaDB

Ressalta-se que o processo é encerrado quando há uma interrupção externa do usuário, neste momento, o arquivo binário está disponível para ser inserido no banco de dados. Após serem armazenados no computador, uma rotina para o carregamento e o backup do banco de dados pode ser configurada, de modo a manter atualizadas as respectivas tabelas de interesse.

### 5.3 Esquemático elétrico do monitor de condição de isolamento

Conforme destacado anteriormente, o monitor de condição de isolamento é composto por duas partes principais: a de monitoramento de variáveis ambientais e a de monitoramento de variáveis elétricas. Estas partes podem ser construídas de forma unificada ou separada em relação ao hardware, de modo que não há prejuízo no funcionamento.

Para a construção do protótipo apresentado nesta tese, optou-se pela abordagem unificada. O esquemático elétrico do hardware de monitor completo é apresentado no

[Apêndice E](#). Neste circuito é possível ver os principais componentes que serão citados ao longo das próximas seções, tais como o microcontrolador ESP32 e os elementos sensores utilizados para a medição das grandezas de interesse.

## 5.4 Monitoramento de variáveis ambientais

### 5.4.1 Sensor de variáveis ambientais - BME680 (Gás, pressão, temperatura e umidade)

Com base na revisão de literatura, verificou-se a necessidade de avaliar variáveis ambientais que tenham influência sobre o processo de degradação do isolamento de equipamentos de alta tensão, dentre estas variáveis, podem ser citadas temperatura e umidade, por exemplo. Por este motivo, para realizar a aquisição dos dados de temperatura e umidade, escolheu-se o sensor da Bosch BME680, apresentado na [Figura 67](#). Este sensor foi escolhido, pois além de ser capaz de aferir através de uma simples implementação as variáveis de temperatura e a umidade com precisão, além de ser robusto para operar no ambiente de subestação.

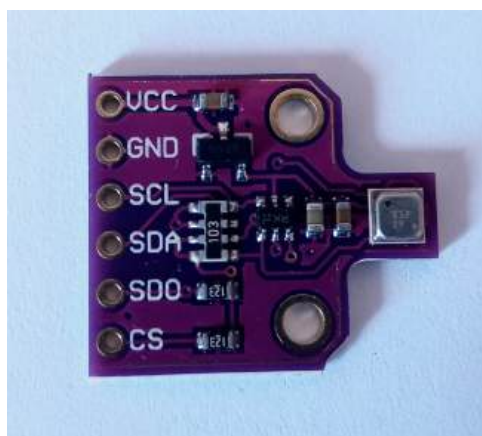


Figura 67 – Foto do sensor BME680

Assim, este sensor permite registrar as grandezas de interesse para a aplicação proposta, além de permitir obter informações sobre outras grandezas, consequentemente, permitindo que a influência destas sobre o processo de degradação do isolamento seja avaliada. Todas essas funcionalidades reunidas em um elemento sensor permitem a redução do número de elementos necessários para a construção do monitor de variáveis ambientais proposto pelo projeto.

A seguir, aspectos técnicos do funcionamento deste sensor e da metodologia desenvolvida para sua implementação são apresentados.

#### 5.4.1.1 Funcionamento do BME680

O sensor BME680 é um sensor compacto usualmente utilizado para aplicações de verificação da qualidade do ar em ambientes internos, automação e controle residencial,

internet das coisas, previsão do tempo, entre outros (BOSCH SENSORTEC, 2019). A pinagem padrão deste sensor pode ser vista na Figura 67, onde as funções dos pinos são as seguintes:

- Pino VCC - Alimentação do sensor;
- Pino GND - Aterramento;
- Pino SCL - Pino do barramento de clock para a comunicação I2C/SPI;
- Pino SDA - Pino do barramento de dados para a comunicação I2C/SPI;
- Pino SDO - Pino para recepção de dados para a comunicação SPI;
- Pino CS - Pino para seleção do dispositivo alvo para a comunicação SPI.

O funcionamento deste sensor pode ser caracterizado pelas etapas apresentadas na Figura 68.

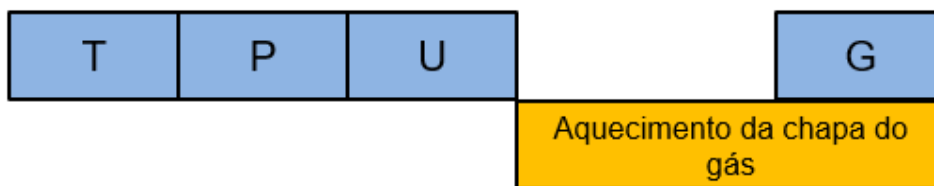


Figura 68 – Esquema de funcionamento do sensor BME680

O processo de medição realizado pelo sensor BME680 e representado na Figura 68 pode ser resumido da seguinte forma: inicialmente ocorrem as etapas de medição de temperatura (T), pressão (P) e umidade (U) - com taxas de amostragem que podem ser definidas pelo usuário. Além disso, o sensor também mede a quantidade de compostos orgânicos voláteis (VOC, do inglês *Volatile Organic Compounds*), presentes no ar. Na Figura 68 esses gases são ilustrados pela variável G. Assim, para que possa ser realizada a medição dos gases VOC, ocorre a etapa de aquecimento de uma chapa presente no sensor e em seguida ocorre a medição da resistência do sensor de gás. Este processo é repetido para cada ciclo de medições, de acordo com a taxa de amostragem definida pelo projetista (BOSCH SENSORTEC, 2019).

Após o processo de medição, os dados de pressão e temperatura podem ser avaliados através de um filtro IIR (filtro de resposta ao impulso infinita). A aplicação deste filtro nas medições é opcional e pode ser utilizado para remover flutuações de curto período. O uso do filtro IIR é justificado pelo fato de a pressão ambiental estar sujeita à diversas mudanças de curta duração causadas por agentes externos, tais como a batida de uma porta ou uma corrente de vento na direção do sensor. Para suprimir tais distúrbios que se



afastam da operação normal, o filtro IIR reduz a largura da banda dos sinais de saída de temperatura e pressão e aumenta a resolução dos dados de saída para 20 bits. Para as medições de gás e umidade, esse procedimento não é necessário, pois os dados de umidade e gases não se alteram rapidamente frente a variações abruptas no meio externo (BOSCH SENSORTEC, 2019).

Além disso, para as medições de temperatura, umidade e pressão, é possível utilizar da técnica de oversampling durante sua amostragem para reduzir o ruído do sinal medido. Para o caso da temperatura e da pressão, a resolução do sinal é definida pelo filtro IIR e pelo oversampling. Todavia, para o caso da umidade, a resolução do sinal é fixa em 16 bits (BOSCH SENSORTEC, 2019). Para essas variáveis, as faixas de operação consideradas para este sensor são as seguintes:

- Temperatura:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ ;
- Umidade: 0 % a 100 %;
- Pressão: 300 hPa a 1100 hPa;

Embora a literatura sobre o tema geralmente indique uma forte relação entre a degradação dos isoladores e o índice de umidade local, a variável de temperatura também será monitorada. Isso permitirá avaliar a correlação da temperatura com as demais variáveis e sua influência na degradação dos isoladores.

#### 5.4.1.2 Medição do sensor de gases VOCs

Conforme apresentado anteriormente na [Figura 68](#), a operação do sensor de gás envolve duas etapas: a primeira consiste no aquecimento da chapa do sensor de gás até uma temperatura alvo (normalmente entre  $200^{\circ}\text{C}$  e  $400^{\circ}\text{C}$ ) e a manutenção dessa temperatura durante um período, a segunda etapa é definida pela medição da resistência da chapa sensível a gás a fim de obter a quantidade de gases VOC. Ainda em relação à [Figura 68](#), nota-se que o processo de aquecimento da chapa do sensor de gás só ocorre após a medição das variáveis de temperatura, pressão e umidade, de forma a evitar que este processo de aquecimento influencie os outros componentes do sensor BME680, afetando a medição das outras grandezas (BOSCH SENSORTEC, 2019).

O sensor de BME680 é capaz de detectar quase todos os tipos de gases VOCs e outros gases contaminantes no ar em ambientes fechados. Diferentemente de outros sensores, que são projetados para serem sensíveis à um tipo específico de gás, o sensor BME680 mede a soma desses gases contaminantes em um ambiente. Os gases VOCs, são compostos orgânicos voláteis, encontrados em solventes, repelentes, produtos de limpeza, combustíveis, entre outros. Esses compostos são perigosos a saúde humana quando inalados em grandes quantidades e tendem a ser mais concentrados em ambientes fechados, justificando a

utilização de equipamentos como o sensor BME680 para garantir os níveis de qualidade do ar ([BOSCH SENSORTEC, 2019](#)).

Em sua saída pura, o sensor retorna o valor da resistência obtida para o nível de VOCs. Quanto maior a concentração desses gases, menor o valor da resistência. O valor da resistência retornado pelo sensor não é um parâmetro adequado para indicar a quantidade de VOCs no ambiente, pois é influenciado por outros fatores, como a umidade. Por este motivo, pode-se calcular o índice de qualidade do ar (IQA), que considera compensações e permite uma interpretação mais próxima da realidade. O cálculo deste índice pode ser feito utilizando o software disponibilizado pela Bosch, onde, com base na resistência medida, são obtidos índices de qualidade do ar, que variam entre 0 (ar limpo) e 500 (ar extremamente poluído). Além disso, esse índice também pode ser calculado utilizando a biblioteca BSEC fornecida pela Bosch, essa biblioteca é compatível com diversas plataformas de controle que podem ser utilizadas em conjunto com o sensor BME680 ([BOSCH SENSORTEC, 2019](#)).

#### 5.4.1.3 Protocolo de comunicação

O sensor BME680 possui dois tipos de protocolo de comunicação, o protocolo SPI e o protocolo I2C. Ambos são protocolos de comunicação serial, o que indica que um byte de informação é passado bit a bit de forma sequencial entre o transmissor e o receptor utilizando apenas um barramento de dados, desta forma, menos conexões são exigidas, em comparação com protocolos de comunicação do tipo paralelo. Além disso, ambos são protocolos síncronos, ou seja, utilizam um sinal de clock gerado pelo dispositivo mestre para sincronizar a comunicação realizada entre este dispositivo e o dispositivo escravo.

O protocolo de comunicação SPI é um protocolo de comunicação full-duplex que utiliza quatro conexões principais, sendo estas:

- MOSI (SDA) - Master output, slave input - Barramento utilizado pelo mestre para enviar dados para o dispositivo escravo;
- MISO (SDO) - Master input, slave output - Barramento utilizado pelo mestre para receber dados do dispositivo escravo;
- SCL - Barramento de clock - Sinal de sincronismo gerado pelo dispositivo mestre;
- CS - Barramento de seleção do dispositivo escravo- utilizado quando mais de um dispositivo escravo está conectado o dispositivo mestre.

Por ser um protocolo *full-duplex*, a comunicação SPI permite um fluxo de dados bidirecional e simultâneo, ou seja, o envio de dados nos sentidos mestre-escravo e escravo-mestre ocorrem utilizando barramentos de dados distintos, de forma que o envio de dados em ambos os sentidos pode ser realizados ao mesmo tempo.

A possibilidade de comunicação *full-duplex* é uma das muitas vantagens da comunicação SPI, outras que podem ser citadas são relacionadas com o menor custo energético deste protocolo, sua flexibilidade, o uso do barramento CS que evita a necessidade de endereçamento individual dos dispositivos escravos, entre outras. Dentre as desvantagens deste protocolo, estão a necessidade de um número maior de pinos - em comparação com outros protocolos seriais-, a limitação do uso de apenas um módulo mestre, a limitação da distância entre o dispositivo mestre e os dispositivos escravos - devido ao maior número de conexões-, entre outros.

Em relação ao protocolo de comunicação I2C, este consiste em um protocolo de comunicação *half-duplex*, no qual o fluxo de dados pode ocorrer de forma bidirecional - tanto do mestre para o escravo, quanto do escravo para o mestre - mas a informação pode fluir para apenas um sentido por vez. A principal característica deste protocolo é o uso de apenas duas conexões:

- SDA - Barramento de dados - responsável pela transmissão de dados do mestre para o escravo e do escravo para o mestre;
- SCL - Barramento de clock - Sinal de sincronismo gerado pelo dispositivo mestre;

Este protocolo permite a conexão de inúmeros dispositivos mestres e escravos nos mesmos barramentos. O esquema de ligação de diferentes dispositivos escravos ao mesmo dispositivo mestre é apresentado na [Figura 69](#).

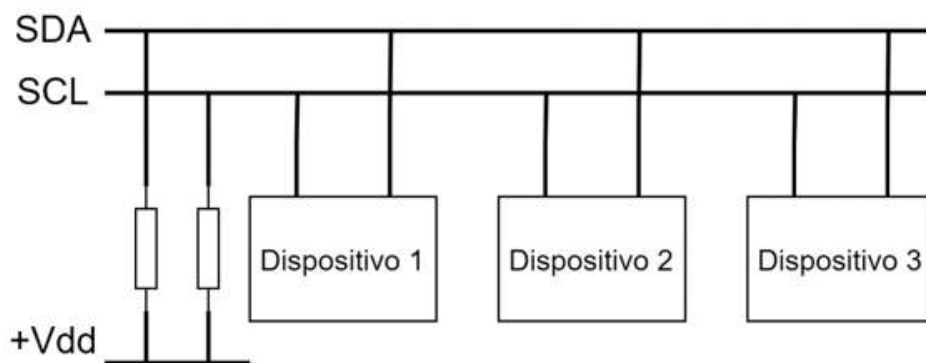


Figura 69 – Esquema de conexão entre diferentes dispositivos escravos e um dispositivo mestre - Comunicação I2C

Por ser um protocolo do tipo *half-duplex*, a velocidade deste protocolo é inferior em relação ao protocolo SPI, sendo esta uma desvantagem. Além disso, por não possuir barramento específico para seleção do dispositivo escravo, o protocolo I2C baseia-se no endereçamento dos dispositivos, de forma que cada dispositivo deve apresentar um endereço único para ser acessado, o que torna o processo de comunicação mais complexo. Todavia, o número reduzido de conexões é o principal atrativo deste protocolo, tornando-o um

protocolo de baixo custo e de simples implementação de hardware, além de permitir maiores distâncias entre os dispositivos mestres e escravos.

Ponderando as vantagens e desvantagens dos dois protocolos de comunicação, neste projeto optou-se pela utilização do protocolo I2C para realizar a conexão entre a placa ESP32 (dispositivo mestre) e o sensor BME680 (dispositivo escravo). Esta escolha se baseou principalmente pelo número reduzido de conexões da comunicação I2C, que permite uma implementação em hardware mais simples.

#### 5.4.1.4 Implementação do sensor BME680

Conforme indicado anteriormente, a forma de conexão escolhida entre o sensor BME680 e o módulo ESP32 foi a do protocolo I2C, desta forma, os pinos SCL e SDA do sensor da Bosch foram utilizados para se conectar ao módulo do microcontrolador. Além desses pinos, os pinos de VCC e GND do sensor também foram conectados para garantir sua alimentação. Desta forma, considerando que os pinos GPIO 22 e GPIO 21 do módulo ESP32 são, respectivamente, os pinos relativos aos pinos SCL e SDA da comunicação I2C, a montagem de hardware desta conexão é apresentada na [Figura 70](#).

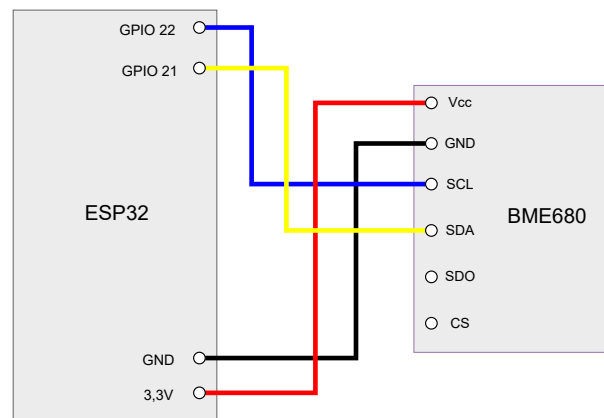


Figura 70 – Esquema de conexão entre diferentes dispositivos escravos e um dispositivo mestre - Comunicação I2C

Para a aquisição das variáveis climáticas, desenvolveu-se um código em linguagem C. Observa-se que é possível utilizar o código desenvolvido com diferentes microcontroladores que possuam o mesmo núcleo de instruções. Na [Figura 71](#) apresenta-se o fluxograma do código em C desenvolvido.

Ressalta-se que o valor da pressão do nível do mar é utilizado no código para que se possa estimar a altitude do local com base na pressão medida para este local em relação à pressão no nível do mar. Assim, considerando a localidade na qual o sensor seria instalado, utilizou-se o valor médio de pressão de nível de mar de 1012 hPa.

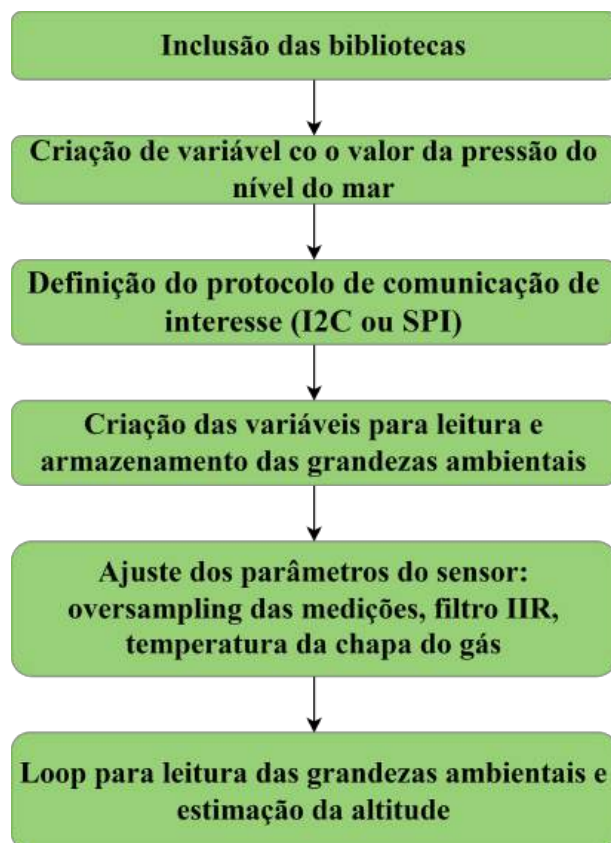


Figura 71 – Fluxograma do código desenvolvido para leitura das grandezas ambientais

#### 5.4.2 Sensor de partículas - DSM501A

Para realizar a aquisição de dados referentes à quantidade de partículas de poeira, optou-se pela utilização do sensor DSM501A (Figura 72), que consiste em um sensor de baixo custo e simples implementação, capaz de quantificar partículas do tipo PM1.0 e PM2.5 presentes no ambiente.



Figura 72 – Sensor DSM501A

A escolha por este sensor deve-se ao fato deste ser compacto, leve e de simples instalação, podendo ser utilizado por meio de uma única fonte de potência. As aplicações do DSM501a usualmente estão relacionadas com processos de purificação do ar e monitoramento da qualidade do ar e da ventilação em ambientes. No contexto abordado nesta

tese, a quantificação do nível de partículas de poeira nas proximidades dos isoladores é de vital importância, pois se relaciona diretamente com a quantidade de contaminantes depositada na superfície desses equipamentos e conseqüentemente, com sua operação.

A seguir, aspectos técnicos do funcionamento do sensor e da metodologia empregada para sua implementação e utilização são apresentados.

#### 5.4.2.1 Funcionamento do DSM501a

O sensor DSM501A é capaz de detectar partículas de poeira de até  $1\ \mu\text{m}$ , exemplos de partículas que podem ser detectadas são: poeira comum, pólen, ácaros, germes, fumaça de cigarro, entre outras. Este sensor possui 5 pinos, com as seguintes funções:

- Pino 1: Controle – Controle da saída Vout1;
- Pino 2: Vout 2 – Saída PWM Vout 2;
- Pino 3: Vcc - Alimentação do sensor (5V);
- Pino 4: Vout 1 – Saída PWM Vout 1;
- Pino 5: GND – Aterramento.

Os pinos 3 e 5 do sensor (Vcc e GND) são padrões, e funcionam assim como para outros sensores tradicionais. O pino 1, de controle, é utilizado para controlar o tamanho das partículas de poeira que podem ser detectadas quando Vout 1 está sendo utilizado. O controle opera a partir do uso de uma resistência conectada ao pino. Se ele não for utilizado, o estado padrão da entrada Vout 1 detecta partículas acima de  $2.5\ \mu\text{m}$ . Com a utilização do pino de controle, a faixa do tamanho de partículas detectadas pode variar entre  $2.5\ \mu\text{m}$  e  $1\ \mu\text{m}$ . O ajuste da sensibilidade é realizado da seguinte forma: utilizando-se um resistor de  $100\ \text{k}\Omega$  a sensibilidade cai pela metade; utilizando-se um resistor de  $27\ \text{k}\Omega$ , a sensibilidade de Vout 1 será igual a de Vout 2.

Em relação aos pinos de saída, o pino 2, representa a saída Vout 2. Essa saída fornece um sinal PWM quando detecta partículas com tamanho superior a  $1\ \mu\text{m}$ . O pino 4 é referente a saída Vout 1, esta saída também fornece um sinal PWM relacionado com a detecção de partículas com tamanho superior à  $2.5\ \mu\text{m}$ .

O princípio de funcionamento deste sensor pode ser caracterizado pelo esquemático apresentado na [Figura 73](#).

Para obter uma medida quantitativa de densidade de partículas suspensa o sensor se baseia no princípio de contagem do número de partículas. O procedimento para contagem do número de partículas é iniciado com o processo de troca de ar entre o interior e o exterior do sensor, para garantir esse fluxo de ar, o sensor possui um resistor que aquece o

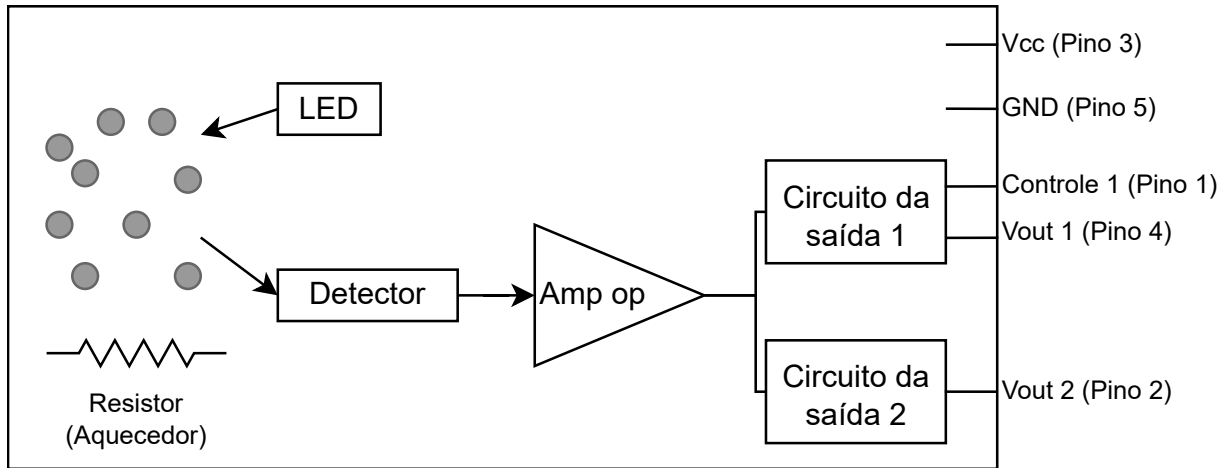


Figura 73 – Esquema de funcionamento do sensor DSM501A

seu interior a fim de promover a troca de ar, de forma que o ar quente vai para o exterior do sensor, enquanto o ar frio entra no sensor.

Para detectar as partículas presentes no ar no interior do sensor, seu funcionamento é similar ao de detectores de fumaça, se baseando em um detector LED ótico que ilumina as partículas em uma "câmara escura". Um fotodetector recebe o sinal de luz emitido que iluminou tais partículas, assim, o sinal recebido pelo detector é proporcional ao tamanho e a quantidade das partículas em suspensão, como mostrado na [Figura 74](#).

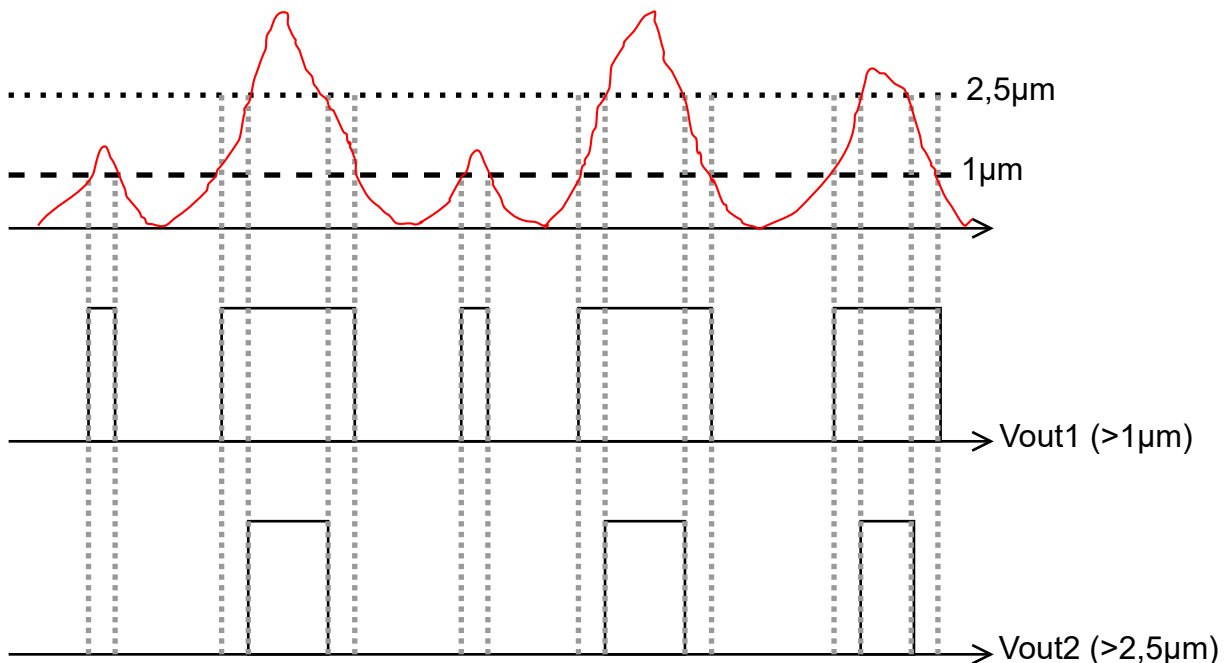


Figura 74 – Detecção das partículas de poeira e sua representação nas saídas do sensor.

O sinal detectado é fornecido nas saídas do sensor através de um sinal PWM. Antes de ser fornecido na saída, este sinal é amplificado e filtrado. Considerando a saída PWM do sensor, para se obter a concentração de partículas presentes, de acordo com o fabricante, deve-se primeiro medir a razão dentre o período no qual o sinal está em nível baixo e o

período total do sinal – relação apresentada na [Figura 75](#) e na Eq. (5.1). Em seguida, a partir dessa razão, é possível obter a concentração de partículas no ar a partir do gráfico fornecido pelo fabricante e apresentado na [Figura 76](#).

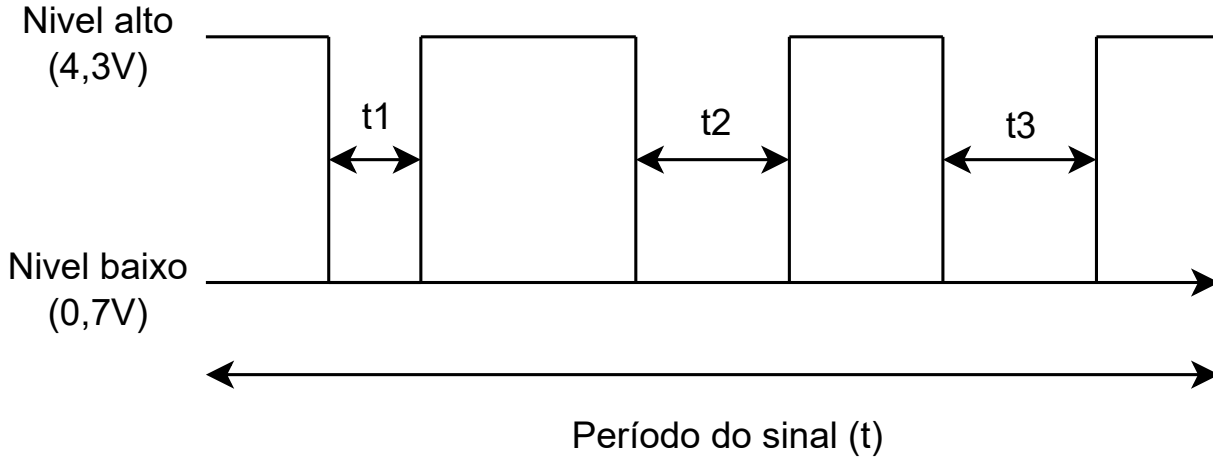


Figura 75 – Sinal PWM fornecido na saída do sensor

$$\text{Ratio}(\%) = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t} * 100 \quad (5.1)$$

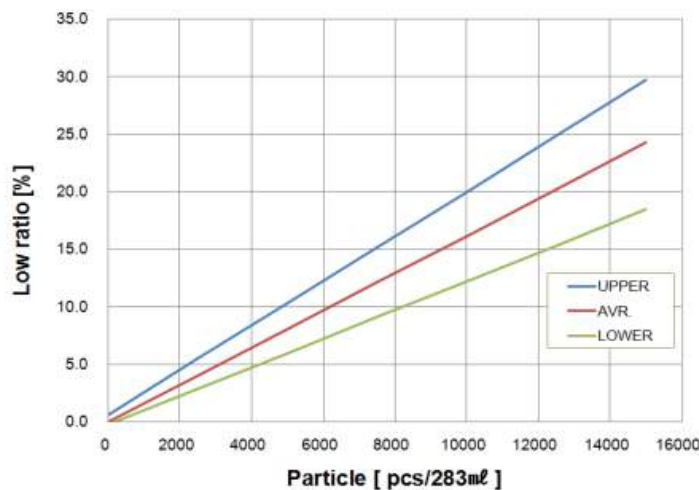


Figura 76 – Relação entre o raio calculado e a concentração de partículas – Fornecido pelo fabricante.

Ressalta-se que usualmente o período total do sinal é de 30 segundos, que também consiste no período de amostragem do sensor. Além disso, para correto funcionamento do sensor, este deve ser instalado verticalmente e deve ser mantido longe de qualquer corrente artificial de ar, pois isso pode afetar a medição. Ademais, indica-se evitar que no ambiente de instalação o sensor entre em contato com partículas adesivas, provenientes de óleos e gorduras, pois estas podem afetar seu funcionamento. Por fim, ressalta-se que o sensor deverá operar no local de instalação por um período pré-determinado antes de ser



removido para limpeza das partículas acumuladas em seu interior. Esse período deve ser estabelecido em colaboração com a equipe de manutenção da subestação e dependerá do nível de poluição presente no local de instalação.

#### 5.4.2.2 Implementação do sensor DSM501a

A conexão entre o sensor DSM501 e o módulo ESP32 foi realizada de acordo com o *datasheet* do sensor, de forma que o pino de saída do sensor fosse conectado a um pino de entrada digital do microcontrolador. A montagem do hardware de conexão entre o sensor e o ESP32 é apresentada na [Figura 77](#).

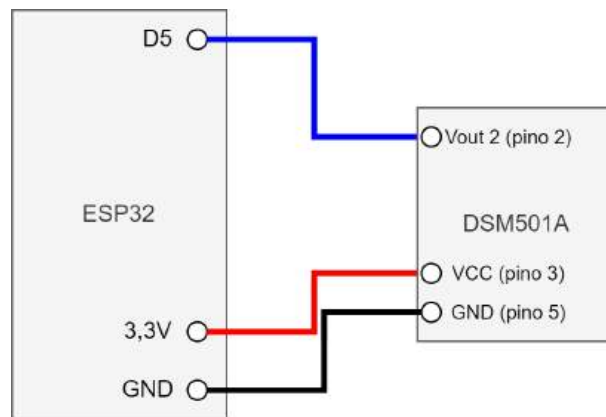


Figura 77 – Esquema de conexão entre o sensor DSM501a e o ESP32

## 5.5 Monitoramento de grandezas elétricas

### 5.5.1 Medição da corrente de fuga

A medição da corrente de fuga fluindo por um elemento de alta tensão, tal como um isolador, pode ser realizada de inúmeras formas. Neste trabalho, optou-se pela medição da corrente utilizando o esquemático apresentado na [Figura 78](#).

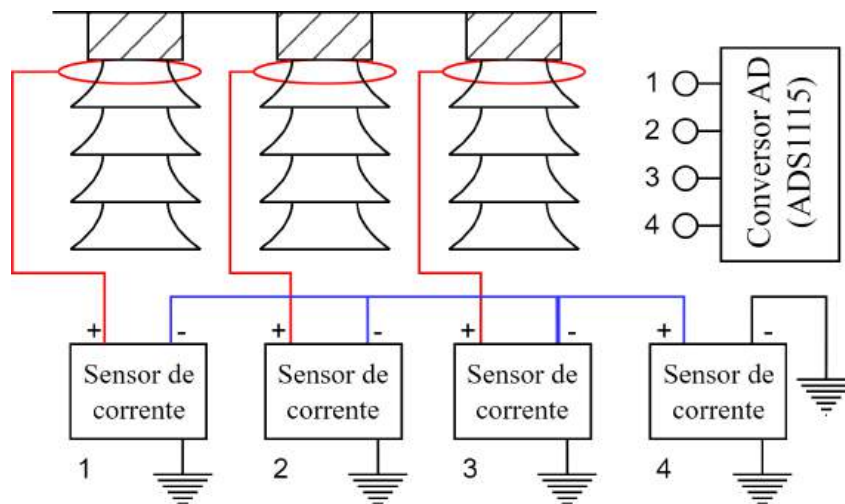


Figura 78 – Ilustração do esquema de medição da corrente de fuga das cadeias de isoladores



(a) Anel de cordoalha para medição da corrente de fuga (b) Detalhe do anel de cordoalha para a medição da corrente de fuga.

Figura 79 – Detalhe do anel de cordoalha para medição da corrente de fuga

Este esquemático apresenta de forma ilustrativa as etapas referentes a medição elétrica, também apresentadas no esquemático elétrico completo do monitor que está na [Apêndice E](#). A partir da [Figura 78](#) verifica-se que para a medição da corrente de fuga em cada uma das cadeias de isoladores, posicionou-se um anel de cordoalha de cobre estanhado ao redor da superfície. Detalhes do anel de cordoalha utilizados são apresentados nas figuras [79a](#) e [79b](#).

Para cada uma das cadeias de isoladores, o anel é responsável por conduzir a corrente de fuga da superfície do equipamento para o respectivo sensor de corrente da cadeia. Esta conexão foi realizada utilizando um cabo de derivação com 8 metros de comprimento, com um condutor de  $2.5 \text{ mm}^2$ . Este cabo é apresentado na [Figura 80](#)

Na [Figura 78](#) verifica-se que além dos sensores de corrente individuais para cada cadeia, há um quarto sensor utilizado para receber a soma residual das três fases. Em seguida, cada um dos sensores é conectado ao conversor analógico-digital, de modo a ter sua medição lida pelo microcontrolador. A leitura dos sensores de corrente é realizada de modo diferencial pelo conversor AD, de modo que são necessários 2 módulos de conversão AD, como detalhado no [Apêndice E](#). Detalhes sobre o funcionamento de cada um destes componentes e sobre o modelo selecionado para compor o protótipo construído neste trabalho são apresentados nas próximas subseções.

### 5.5.2 Sensor de corrente

O elemento utilizado para realizar a medição das correntes foi um transmissor de corrente de fuga. Este sensor foi escolhido por sua robustez para operar em ambientes sujeitos a estresses térmicos e mecânicos, como pode ser o ambiente de uma subestação. Este sensor, apresentado na [Figura 81](#), é tipicamente aplicado em projetos de monitoramento



Figura 80 – Detalhe do cabo de derivação para a medição da corrente de fuga de correntes de fuga em sistemas de alta tensão, com foco nos sistemas de isolamento, como é o caso deste projeto.



Figura 81 – Elemento transmissor de corrente de fuga AC

Em relação os terminais do sensor, visíveis na [Figura 81](#), tem-se:

- Terminal 1 - Terminal positivo para a entrada da alimentação em tensão contínua de 24 V;
- Terminal 2 - Terminal negativo para a entrada do potencial de referência da alimentação;

- Terminal 3 - Saída CC do sensor, fornece uma tensão entre 0 a 5 V;
- Terminal 4 - Terminal de referência do sensor (GND) para leitura do sinal de saída;

Este sensor realiza a leitura de correntes alternadas na faixa de 0 a 20 mA, sendo ideal para aplicações nas quais os níveis de amplitude de corrente são reduzidos, como é o caso deste projeto, no qual os níveis de corrente de fuga que percorrem os isoladores oscilam na casa dos  $\mu\text{A}$ . Conforme destacado na definição dos terminais do sensor, a partir da leitura da corrente, o sensor fornece em sua saída um sinal CC entre 0 a 5 V. Ademais, ressalta-se que o sensor deve ser alimentado por uma fonte DC de 24 V, para o caso do projeto, foi utilizada uma fonte de parede de 24 V e 1 A.

Para leitura do sinal de corrente de entrada, o cabo que conduz a corrente de fuga do isolador deve ser transpassado no interior do sensor, conforme a ilustrado na [Figura 82](#). Dessa forma, o sensor de corrente opera de maneira análoga a um amperímetro do tipo alicate, onde a leitura da corrente é baseada no campo magnético gerado pelo fluxo de corrente através do condutor. A intensidade desse campo é diretamente proporcional à corrente que flui no condutor, possibilitando assim a sua medição precisa.

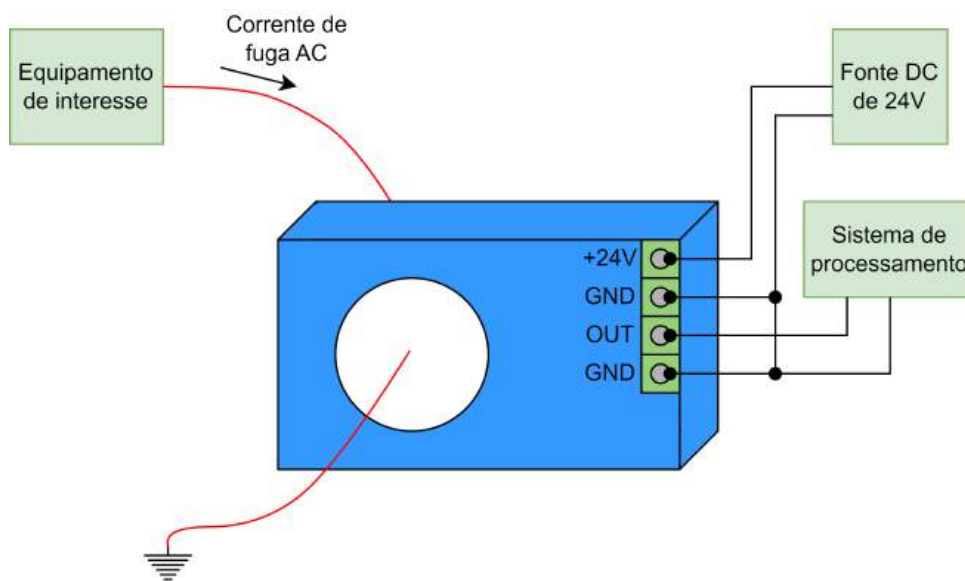


Figura 82 – Montagem experimental para a utilização do sensor de corrente de fuga.

A saída do sensor consiste em uma tensão proporcional às correntes alternadas que fluem no cabo passando por seu interior. A relação entre a corrente de entrada e a tensão de saída é linear, conforme apresentado na [Figura 83](#). A construção da curva do sensor foi realizada experimentalmente utilizando o aparato apresentado na [Figura 84](#). Nesta figura é possível ver o simulador de sistema de energia F6150, que foi aplicado no fornecimento de correntes alternadas variando entre 0 e 20 mA. Além disso, para a construção da curva, a saída CC do sensor foi medida usando um multímetro, como ilustrado na [Figura 83-a](#).

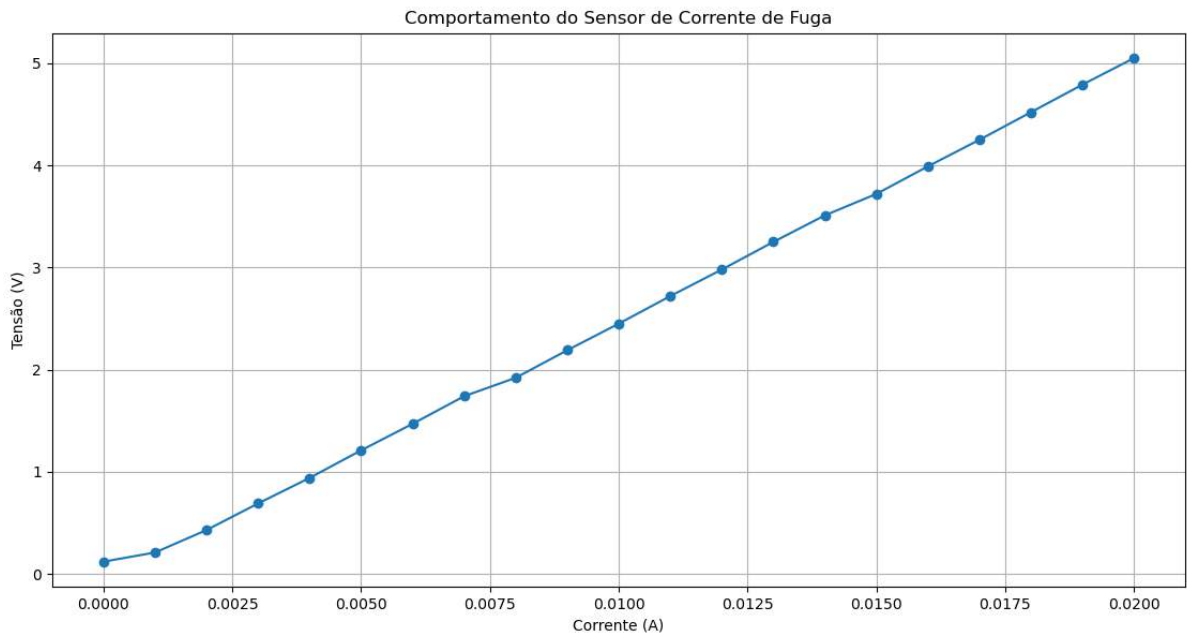


Figura 83 – Relação entre a corrente de entrada e a tensão de saída do sensor de corrente de fuga

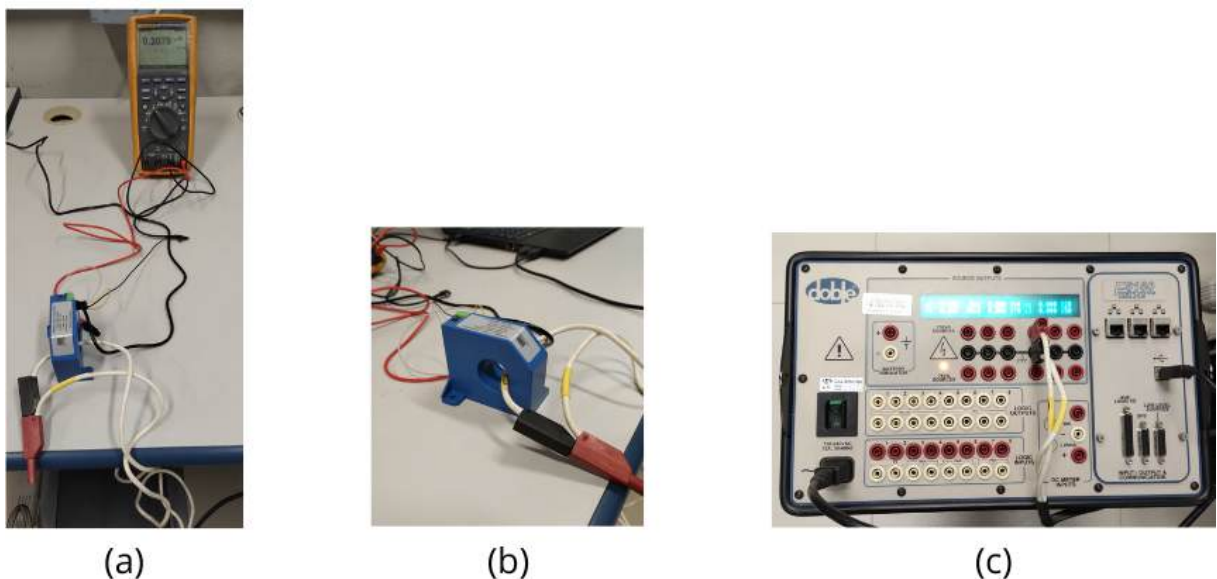


Figura 84 – Aparato experimental para a construção da curva do sensor de corrente. (a) Medição da saída do sensor de corrente utilizando um multímetro; (b) Detalhe da passagem do cabo de corrente no interior do sensor; (c) Simulador de sistema de energia F615 utilizado para fornecer as correntes AC lidas pelo sensor.

### 5.5.3 Conversor analógico digital

O equipamento que realiza a interface entre a medição de corrente de fuga dos isoladores e o microcontrolador consiste em um conversor analógico digital (AD), conforme pode ser observado no [Apêndice E](#). Tradicionalmente este tipo de conversor é empregado

em sistemas embarcados para realizar a transformação de um sinal analógico para um sinal digital. Os sensores do SE fornecem o sinal analógico, que é obtido por meio da leitura das grandezas físicas de interesse. Os microcontroladores não são capazes de interpretar grandezas analógicas, pois suas operações internas dependem de sinais digitais. Portanto, recorre-se aos conversores ADC para realizar essa conversão.

Para compreender o funcionamento de um conversor AD, dois conceitos são fundamentais: amostragem e quantização. Ambos os conceitos foram explicados anteriormente no [Capítulo 3](#) e são ilustrados na [Figura 85](#), na qual a amostragem é relacionada com o eixo horizontal e a quantização com o vertical.

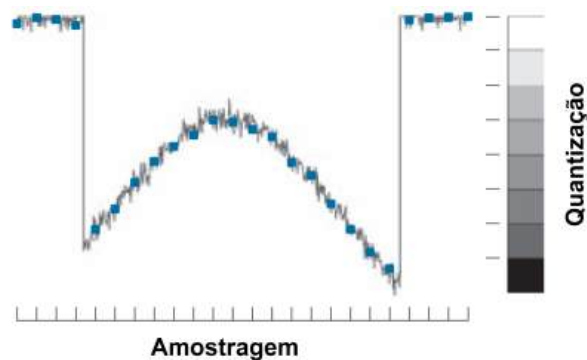


Figura 85 – Ilustração dos conceitos de amostragem e quantização no processo de conversão de um sinal analógico para digital - Fonte: ([GONZALEZ; WOODS, 2018](#))

Para a construção do protótipo do monitor apresentado nesta tese de doutorado, o conversor AD selecionado consistiu no conversor ADS1115, apresentado na [Figura 86](#). Este conversor possui 16 bits de resolução, o que indica que a faixa de valores analógicos lidos em sua entrada pode ser representada em até  $2^{16}$ , ou seja, 65536 valores distintos. Esta resolução é superior a dos conversores AD internos ao microcontrolador ESP32, cuja resolução é de 12 bits, de modo que apenas 4096 valores distintos podem ser representados. Além disso, a taxa de conversão do dispositivo foi configurada para a velocidade máxima, permitindo a conversão de 860 amostras por segundo, assim, garante-se uma medição mais precisa da corrente de fuga ([TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009](#)).



Figura 86 – Conversor analógico-digital ADS1115

Este conversor possui dois modos de atuação distintos. O primeiro modo consiste em uma atuação única, na qual o conversor realiza uma conversão e em seguida entra em um modo de baixa energia, no qual aguarda um acionamento para realizar uma nova conversão. O segundo modo, utilizado no protótipo construído neste trabalho, consistiu na abordagem contínua, na qual uma nova conversão é iniciada assim que a anterior é finalizada (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009).

A Figura 87 apresenta a estrutura interna do ADS1115, nesta figura é possível observar um multiplexador, um elemento PGA e um interface de comunicação I2C na saída do conversor. Além disso, é ilustrado o conversor ADC com 16 bits de resolução, que utiliza para a conversão uma tensão interna de referência.

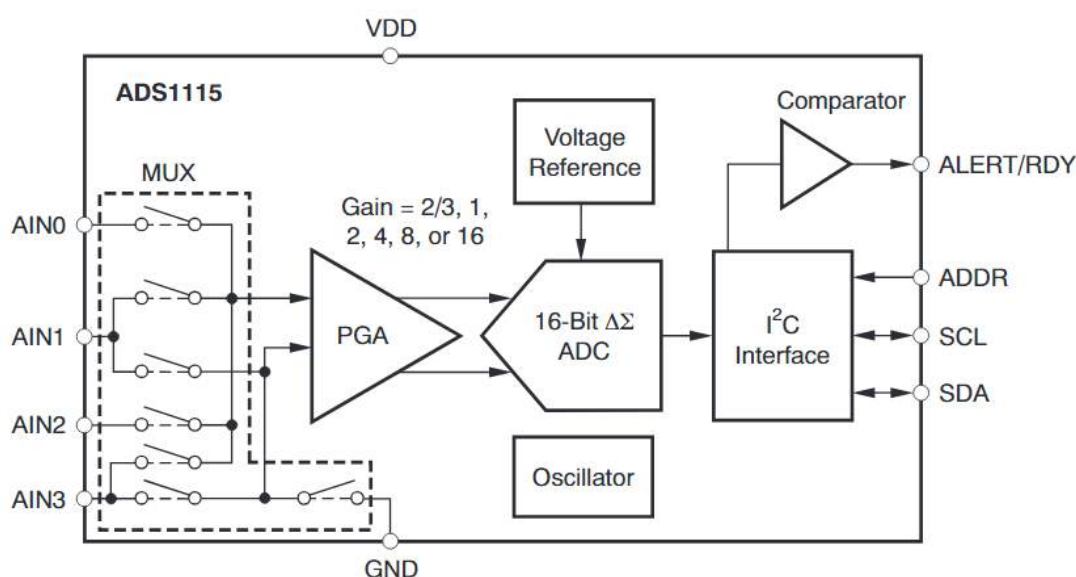


Figura 87 – Esquemático da estrutura interna do dispositivo ADS1115 - Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009)

Conforme ilustrado na figura anterior, o ADS1115 possui um amplificador de ganho programável (*programmable gain amplifier*, PGA) integrado em sua placa que permite que os sinais de tensão na entrada variem entre  $\pm 6.144$  V até  $\pm 256$  mV. Desta forma, o dispositivo é capaz de trabalhar com precisão sinais de grande e pequena amplitude (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009).

Ademais, este dispositivo também possui um componente multiplexador em sua entrada, o que permite que como entrada sejam fornecidos 4 sinais individuais ou dois sinais diferenciais. Para medir as quatro entradas diretamente, sem considerar uma relação diferencial entre elas, o multiplexador é configurado de modo que cada entrada é medida em relação ao terra (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009). Nesse trabalho, optou-se pelo uso do conversor no modo diferencial, assim, uma de suas entradas é conectada no referencial terra do circuito que esta sendo avaliado, garantindo maior estabilidade nas medições.

Além disso, é possível observar na [Figura 87](#) que o conversor possui um comparador digital programável que permite que seja emitido um alerta em um dos pinos de saída. Este alerta é ativado quando os dados convertidos ultrapassam um limiar previamente estabelecido e permite que o conversor seja utilizado de modo simples e sem a necessidade de circuitos adicionais para aplicações que exijam tal funcionalidade ([TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009](#)). Este pino de alerta será utilizado para indicar o fim da conversão, de modo a dar início a conversão seguinte.

Na lateral direita do dispositivo, apresentada na [Figura 87](#), observa-se que a saída do ADS1115 é fornecida através da comunicação I2C, cujo funcionamento já foi explicado anteriormente. De acordo com o manual, ([TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009](#)), é possível utilizar o ADS1115 com outros dispositivos conectados ao mesmo barramento I2C de um microcontrolador. Para isso, é necessário utilizar o endereçamento inerente deste tipo de comunicação. No caso do ADS1115 podem ser definidos até quatro endereços distintos através do pino ADDR, o que permite que até quatro dispositivos distintos sejam conectados ao mesmo barramento I2C. Para a construção do protótipo do monitor, cujo diagrama elétrico é detalhado em [Apêndice E](#), esta abordagem foi utilizada para permitir a utilização de dois conversores ADS1115 conectados ao mesmo barramento do sensor BME680, que também utiliza este tipo de comunicação, conforme descrito na [subseção 5.4.1](#).

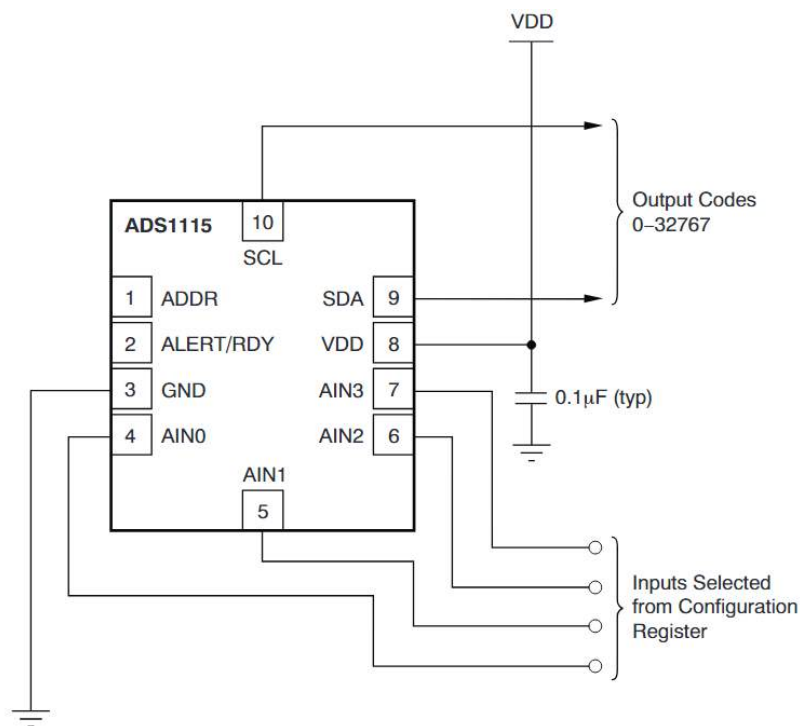


Figura 88 – Esquemático das conexões do dispositivo ADS1115 - Fonte: ([TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009](#))

Para concluir, destaca-se que o conversor utilizado possui 10 pinos, ilustrados na [Figura 88](#), e cujas funcionalidades são descritas a seguir:



- Pino 1 - Pino ADDR, permite a seleção do endereço do dispositivo I2C escravo;
- Pino 2 - Pino de Alerta, consiste em uma saída de comparação digital;
- Pino 3 - Pino de aterramento;
- Pino 4 - AIN0, pino de entrada analógica. Consiste no primeiro canal de entrada do dispositivo. Se forem utilizadas entradas diferenciais, deve ser a entrada positiva.
- Pino 5 - AIN1, pino de entrada analógica. Consiste no segundo canal de entrada do dispositivo. Se forem utilizadas entradas diferenciais, deve ser a entrada negativa.
- Pino 6 - AIN2, pino de entrada analógica. Consiste no terceiro canal de entrada do dispositivo. Se forem utilizadas entradas diferenciais, deve ser a entrada positiva.
- Pino 7 - AIN3, pino de entrada analógica. Consiste no quarto canal de entrada do dispositivo. Se forem utilizadas entradas diferenciais, deve ser a entrada negativa.
- Pino 8 - Pino de alimentação, a tensão de alimentação deve ser entre 2 V e 5.5 V ;
- Pino 9 - Pino SDA, pino utilizado para a comunicação I2C, responsável pela transmissão e recepção de dados seriais;
- Pino 10 - Pino SCL, pino utilizado para a comunicação I2C, responsável pelo sinal de sincronização da comunicação serial;

#### 5.5.4 Implementação do conversor AD

Neste projeto, o conversor AD é utilizado para ler os sinais de saída do sensor de corrente. Assim, espera-se na entrada do conversor, sinais entre 0 e 5 V. Desta forma, foi selecionada a faixa de operação do conversor para  $\pm 6.144$  V. Para o conversor AD utilizado, os sinais analógicos de entrada são transformados em valores digitais utilizando a lógica de conversão apresentada na [Figura 89](#).

Para a implementação do conversor no projeto, utilizou-se o pino de alerta que indicava o fim de uma conversão, combinado com o uso de interrupções no microcontrolador. O fluxograma apresentado na [Figura 90](#) ilustra essa lógica de implementação. A mudança de estado do pino de alerta foi utilizada para sincronizar a execução do programa, assim, a leitura do resultado da conversão AD ocorre apenas após a indicação da finalização desta conversão.

Conforme destacado anteriormente, a taxa de aquisição do conversor AD foi configurada para o máximo permitido, sendo esta 860 amostras por segundo. Todavia, a combinação da leitura do conversor AD com o envio dos dados LoRa prejudicava a taxa de aquisição total. Desta forma, a fim de evitar a perda de leitura dos valores de corrente, optou-se por inicialmente adquirir os dados de corrente provenientes do sensor de

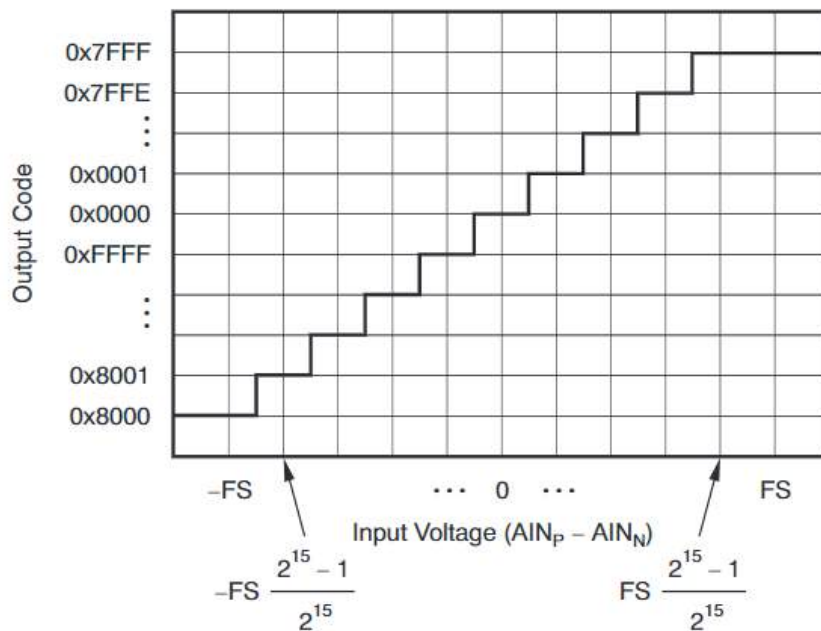


Figura 89 – Lógica de conversão entre sinais analógicos de entrada e sinais digitais de saída do conversor AD - Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, 2009)

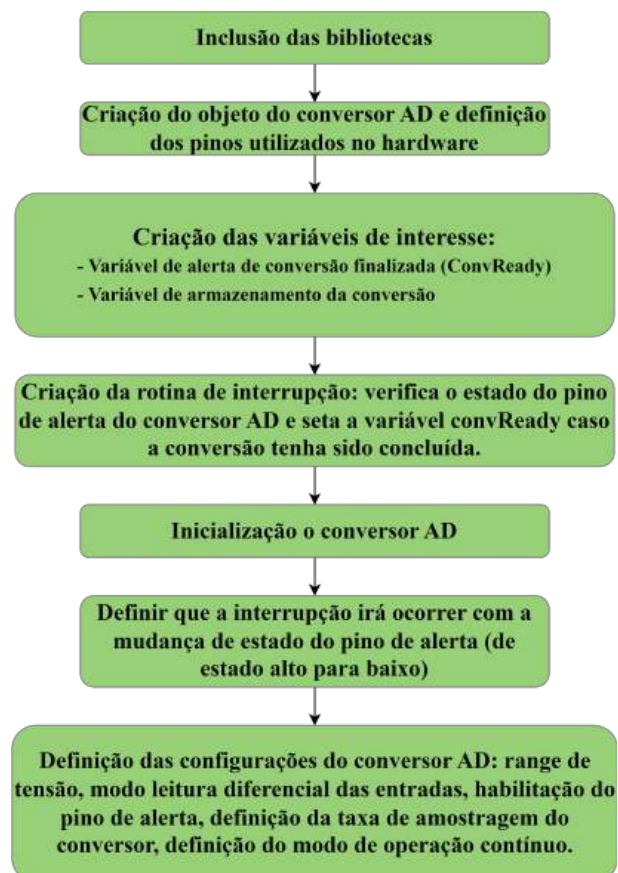


Figura 90 – Fluxograma da implementação da leitura do conversor AD

corrente e lidos pelo conversor AD a uma taxa de 860 amostras por segundo. Em seguida,

armazenar esses dados em um *buffer* interno ao microcontrolador e realizar o cálculo do valor RMS das variáveis deste *buffer* conforme ele fosse preenchido.

Optou-se pelo uso do valor RMS, pois este representa de modo significativo a potência média do sinal medido. Assim, variações nesse parâmetro podem indicar eventuais alterações no comportamento das grandezas de interesse. Além disso, o sinal de corrente de fuga medido não constitui uma senoide perfeita, o que requer uma métrica consistente para diferentes formas de onda, como é o caso do valor RMS.

Escolheu-se um *buffer* de tamanho aproximado de 860/60, considerando que a frequência fundamental do sinal é de 60 Hz. Desta forma, a cada 15 amostras valor RMS era calculado. O valor RMS calculado era salvo para que o valor RMS seguinte pudesse ser calculado considerando o valor anterior. O envio do valor RMS foi definido para ciclos de leitura de 180 amostras, assim, em torno de 4,7 valores de RMS eram enviados por segundo via rádio LoRa. Desta forma, o envio de informações via rádio LoRa não prejudicou a taxa de aquisição do sinal de corrente. Também foi implementada uma lógica visando a indicação em uma variável caso o valor atual do RMS desviasse significativamente do valor anterior, a fim de verificar eventuais comportamentos anômalos da corrente.

O loop de cálculo do RMS da corrente de fuga só é ativado caso a interrupção que verifica a finalização da conversão AD permita, conforme descrito anteriormente. O fluxograma ilustrando o processo aqui descrito e implementado em software é apresentado na [Figura 91](#).

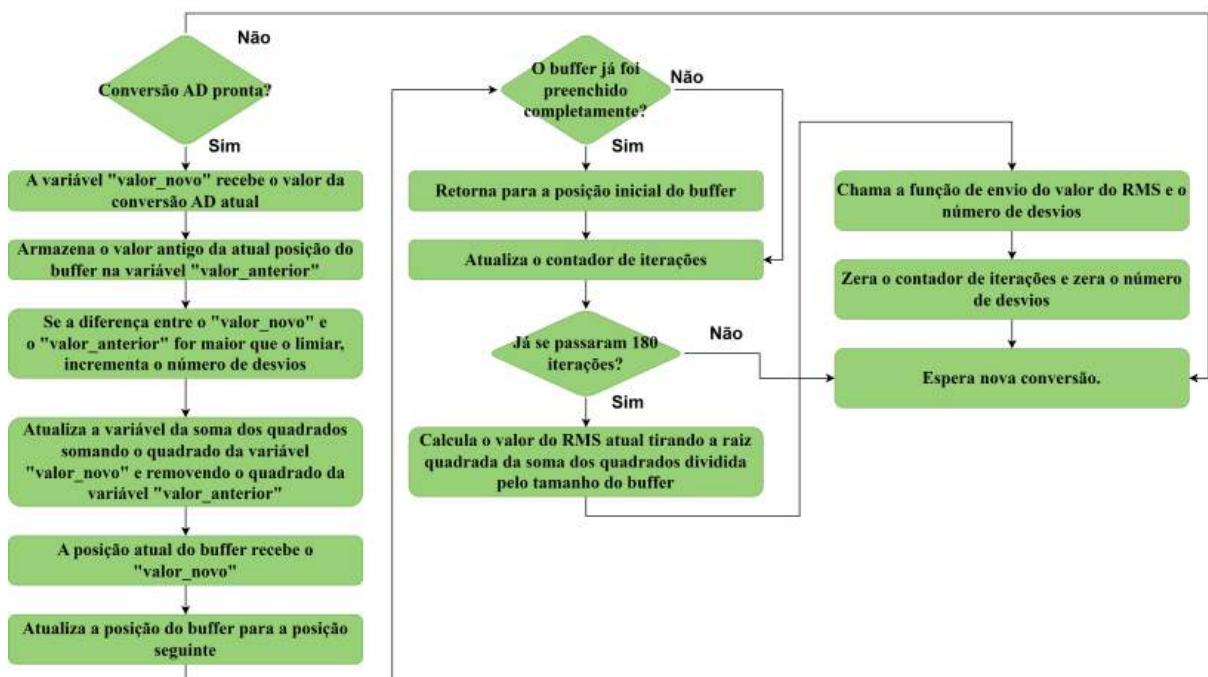


Figura 91 – Fluxograma da implementação do cálculo do valor RMS da corrente de fuga

## 5.6 Circuitos complementares

Para compor o circuito de alimentação do sistema embarcado de monitoramento desenvolvido, foi escolhida uma fonte chaveada de parede. Esta fonte, cuja montagem é apresentada na [Figura 92](#), recebe como entrada a alimentação da rede elétrica e fornece em sua saída uma tensão de 5 V, adequada para alimentar o microcontrolador ESP32 e alguns dos periféricos do sistema de monitoramento.



Figura 92 – Montagem da fonte chaveada utilizada

Os dados da fonte são apresentados a seguir:

- Tensão DC de saída: 5 V;
- Corrente de saída: 10 A;
- Potência: 50 W
- Frequência: 50 Hz

Em relação ao microcontrolador ESP32, utilizado como unidade de processamento do SE desenvolvido, existem diferentes opções de reset integradas na placa. Além disso, a placa conta com um circuito oscilador externo conectado aos pinos  $XTAL_P$  e  $XTAL_N$ , conforme apresentado na [Figura 93](#). Este circuito é composto por um cristal oscilador

de 40 MHz e capacitores de filtragem. Ressalta-se que outras configurações de circuito oscilador podem ser definidas para este microcontrolador, dependendo da necessidade do tipo de aplicação.

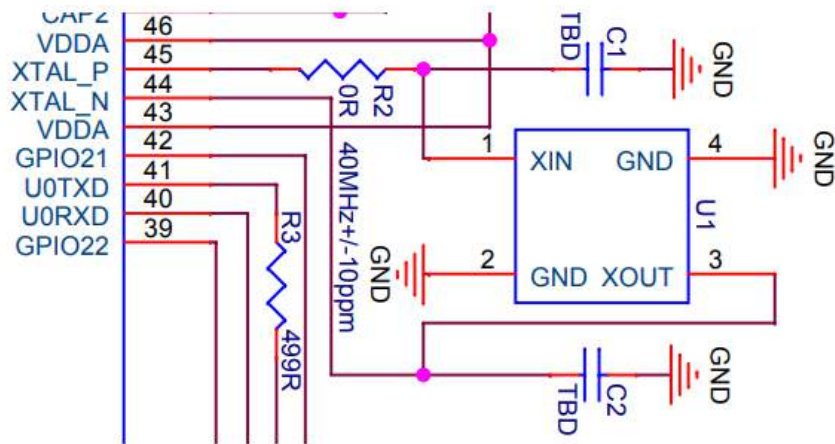


Figura 93 – Esquemático do circuito oscilador externo do ESP32 - Fonte: (ESPRESSIF SYSTEMS, 2021)

#### 5.6.1 Caixa de acondicionamento

Para acondicionar o sistema de monitoramento foi utilizada uma caixa de passagem específica para montagens elétricas, conforme mostrada na Figura 94.



Figura 94 – Caixa de acondicionamento utilizada para a montagem do circuito

Em um projeto de sistema embarcado, a estrutura externa tem como finalidade proteger o projeto e o usuário. A caixa utilizada possui 11 cm de comprimento, 15 cm de largura e 7 cm de profundidade. Todavia, caixas com outras dimensões podem ser utilizadas caso deseje-se mudar a disposição dos componentes ou adicionar elementos ao SE. Além disso, a caixa escolhida possui proteção mecânica e grau de proteção IP 66, que define proteção contra poeira e jatos fortes de água, sendo ideal para sistemas com operação em ambientes externos.

## 5.7 Implementação do software

Como explicado anteriormente, os sistemas de monitoramento de variáveis ambientais e elétricas propostos são compostos por dois módulos principais, um módulo de transmissão e um de recepção. O funcionamento do módulo de transmissão se baseia na coleta das grandezas medidas nas proximidades dos equipamentos de interesse e na transmissão desses dados para o módulo de recepção. A transmissão de dados entre os módulos é realizada através da comunicação LoRa. O módulo de recepção por sua vez funciona como uma unidade concentradora de dados. Este elemento é responsável por receber os dados via comunicação LoRa e repassar estes dados para seu destino final, que pode ser: armazenamento em banco de dados local, comunicação e armazenamento com banco de dados remoto ou atualização automática dos dados em uma página web que informa as medições. Desta forma, verifica-se a necessidade de dois softwares principais, um para o módulo transmissor e um para o módulo receptor.

A implementação do software do sistema embarcado foi realizada utilizando como técnica de gerenciamento de tarefas o sistema operacional em tempo real do ESP32. A teoria sobre o funcionamento de RTOS foi apresentada no [Capítulo 3](#) e se baseia na definição de tarefas cujas execuções serão escalonadas pelo gerenciador do sistema, de modo que todos os prazos previstos sejam cumpridos. Além disso, considerando que o microcontrolador ESP32 possui dois núcleos de processamento, foi possível alocar tarefas para os dois núcleos, de forma a facilitar o gerenciamento.

### 5.7.1 Software do módulo transmissor

No protótipo do monitor desenvolvido para este trabalho, o módulo de transmissão é composto pelos seguintes itens: um sensor de poeira DSM501, um sensor de grandezas ambientais BME680 e 2 conversores AD, que são conectados aos sensores de corrente.

Para organizar a leitura de tais elementos, que possuem taxas amostrais distintas, utilizou-se a funcionalidade de RTOS fornecida pelo microcontrolador ESP32. Ao todo foram criadas duas tarefas, uma para a leitura e envio dos dados ambientais e outra para a leitura e envio dos dados lidos pelos conversores AD. Ambas as tarefas operam de modo simultâneo, não interferindo na operação uma da outra. Esta divisão foi realizada e era necessária, pois os dados lidos pelos conversores AD possuem uma frequência significativamente maior do que os dados colhidos pelos sensores ambientais. Os fluxogramas apresentados na [Figura 95](#) destacam o funcionamento do código do módulo transmissor.

Ressalta-se que, caso desejado, os sistemas de monitoramento de variáveis elétricas e ambientais podem ser implementados em hardwares separados. Neste caso, a organização das tarefas seria alterada, pois haveriam dois módulos de transmissão, um para cada tipo de variável. Embora seja necessária tal alteração, esta seria realizada de modo simples, pois

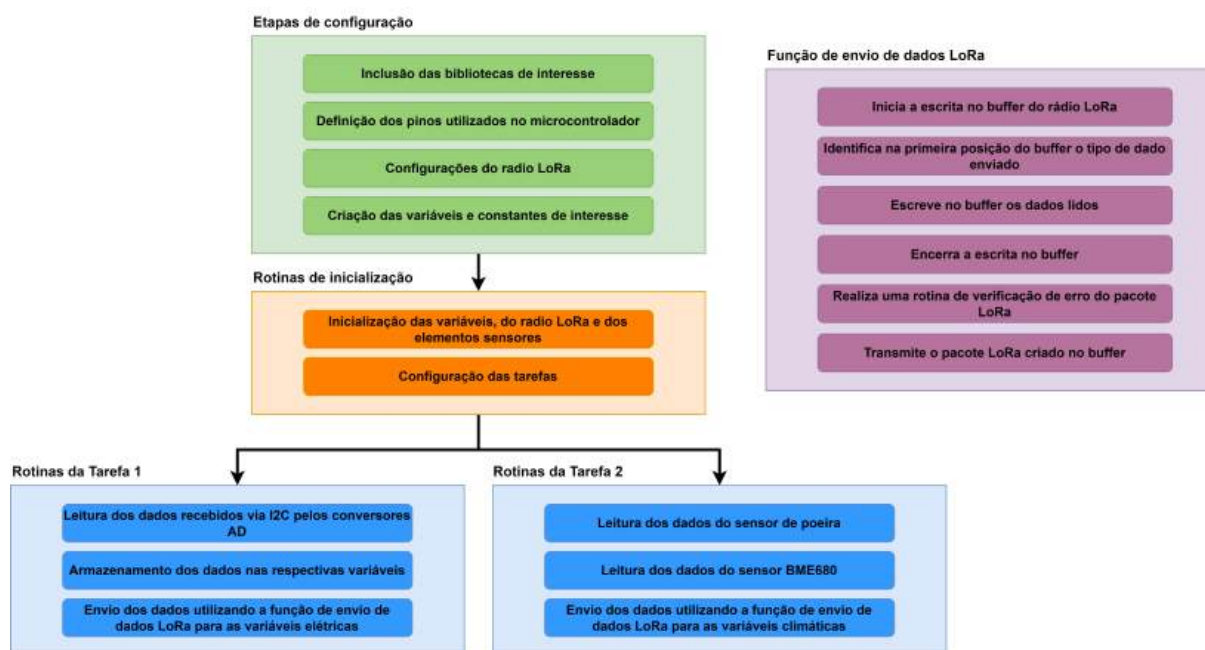


Figura 95 – Fluxograma de funcionamento do software do módulo de transmissão do monitor de isolamento

o código foi construído de forma modular, assim, bastaria separar as tarefas responsáveis pela medição de cada tipo de variável.

### 5.7.2 Software do módulo receptor

A recepção dos pacotes é realizada pelo módulo de recepção, que fica instalado na casa de controle da subestação, e que é conectado ao computador do projeto por meio de um cabo USB. Este módulo de recepção recebe os pacotes via LoRa, os identifica e armazena os dados nas variáveis correspondentes, conforme ilustrado na [Figura 96](#).

Após estes processos, o módulo de recepção escreve em seu terminal serial o dado recebido como um número binário, conforme as etapas descritas na [subseção 5.2.2](#).

## 5.8 Conclusões do capítulo

Este capítulo descreve com detalhes a implementação e o funcionamento do sistema de monitoramento de condição de isolamento proposto no trabalho. O capítulo está dividido em duas partes principais, sendo a primeira dedicada aos aspectos do hardware do monitor e a segunda ao software embarcado neste sistema. Foram apresentados detalhes sobre todos os elementos sensores utilizados, assim como informações sobre os protocolos de comunicação e os esquemáticos elétricos do protótipo desenvolvido. Além disso, detalhes técnicos sobre os circuitos complementares foram apresentados.

Em relação ao software embarcado do monitor, o capítulo apresentou de modo ilustrativo diversos fluxogramas que descrevem as atividades realizadas pelo monitor e

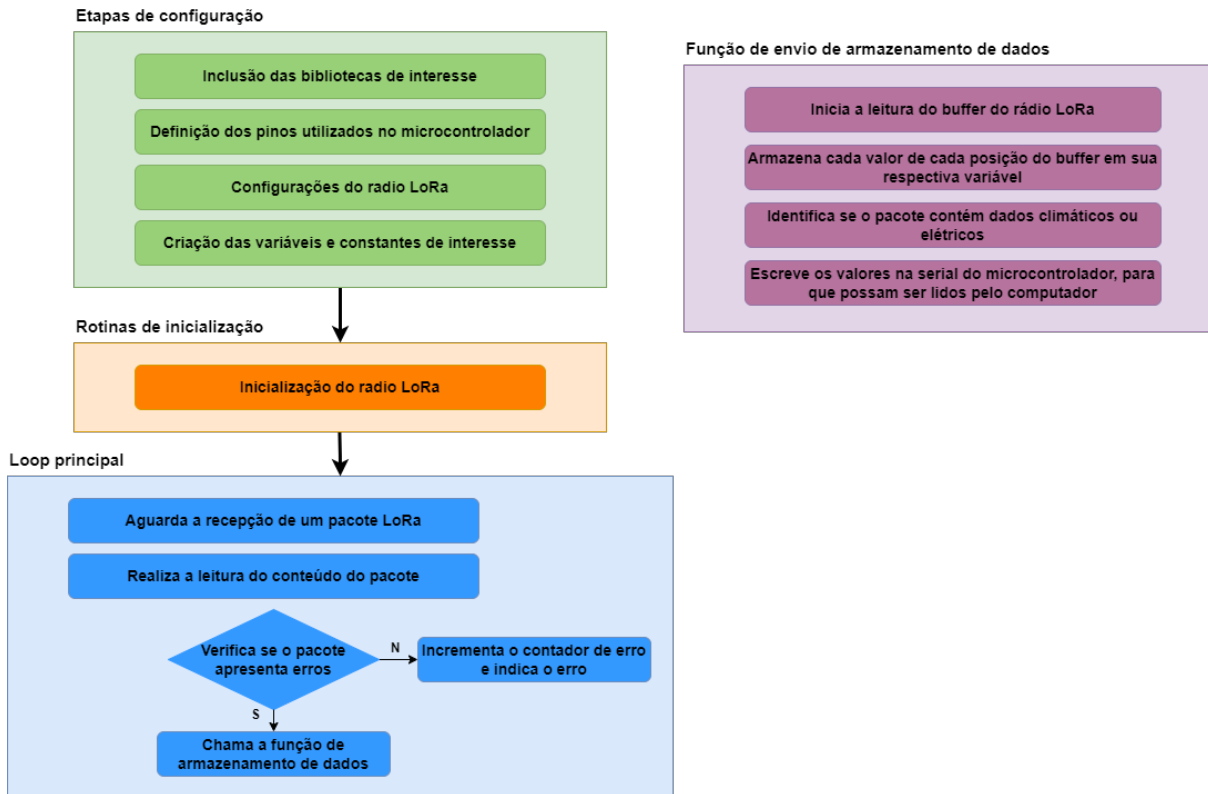


Figura 96 – Fluxograma de funcionamento do software do módulo de transmissão do monitor de isolamento

implementadas no software. Este foi construído com base na utilização de técnicas de gerenciamento de RTOS e foi projetado de forma modular, possibilitando posteriores alterações no design do monitor sem a necessidade de grandes modificações no software.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta pesquisa de doutorado teve como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo para realizar o monitoramento da condição de isolamento de equipamentos de alta tensão. Os resultados serão apresentados com dois principais focos: o primeiro deles refere-se à apresentação do protótipo do sensor, que foi construído e instalado em subestações de energia; o segundo diz respeito à validação do funcionamento do sensor, conforme planejado na pesquisa. Ademais, ao final do capítulo é apresentada uma discussão sobre possíveis trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos com base nos dados coletados pelo monitor.

### 6.1 Implementação e instalação do sistema de monitoramento

A partir dos critérios definidos para o hardware e o software do monitor apresentados no capítulo anterior, foram construídos os protótipos do módulo transmissor e receptor do monitor, que são apresentados respectivamente nas Figuras 97 e 98.



Figura 97 – Protótipo do módulo transmissor do monitor de condição de isolamento proposto

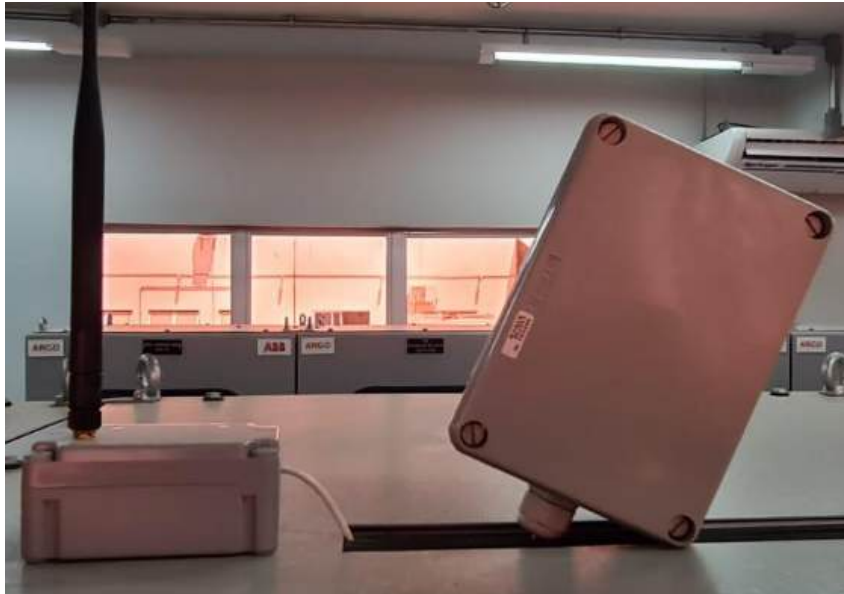


Figura 98 – Protótipo do módulo receptor do monitor de condição de isolamento proposto

Conforme descrito anteriormente, o módulo transmissor apresentado na [Figura 97](#) foi instalado nas proximidades dos equipamentos monitorados, enquanto o módulo receptor ([Figura 98](#)) foi instalado no interior da casa de controle da subestação, conectado a um computador para realizar o armazenamento de dados.

Para a validação dos protótipos desenvolvidos, estes foram instalados em quatro subestações distintas de uma empresa de linhas de transmissão cujos ativos ficam localizados na região Nordeste do Brasil. Todos os sistemas de monitoramento instalados estão operando corretamente e fornecendo informações para a equipe da USP de forma ininterrupta desde sua instalação. Detalhes da instalação e do equipamento no qual foi instalado um dos protótipos são apresentados na [Figura 99](#).

## 6.2 Medições obtidas a partir do monitoramento das subestações

Nesta seção são detalhes dos dados coletados pelos protótipos do monitor que foram instalados em algumas subestações da região nordeste. As figuras [100](#), [101](#) apresentam as medições do monitor de variáveis ambientais para as variáveis de interesse de temperatura e umidade, respectivamente.

As medições foram obtidas para o mês de julho de 2022. Para essas grandezas é possível verificar uma sazonalidade diária, de forma que cada hora do dia apresenta um comportamento característico. Em relação aos resultados obtidos para o sistema de monitoramento de variáveis elétricas, a [Figura 102](#) apresenta o comportamento médio da corrente de fuga ao longo do dia medido para as três fases do sistema analisado.

Com base nos gráficos, é evidente a semelhança entre as fases B e C. Ademais, embora a fase A apresente maior amplitude em relação ao nível de corrente, verifica-se que

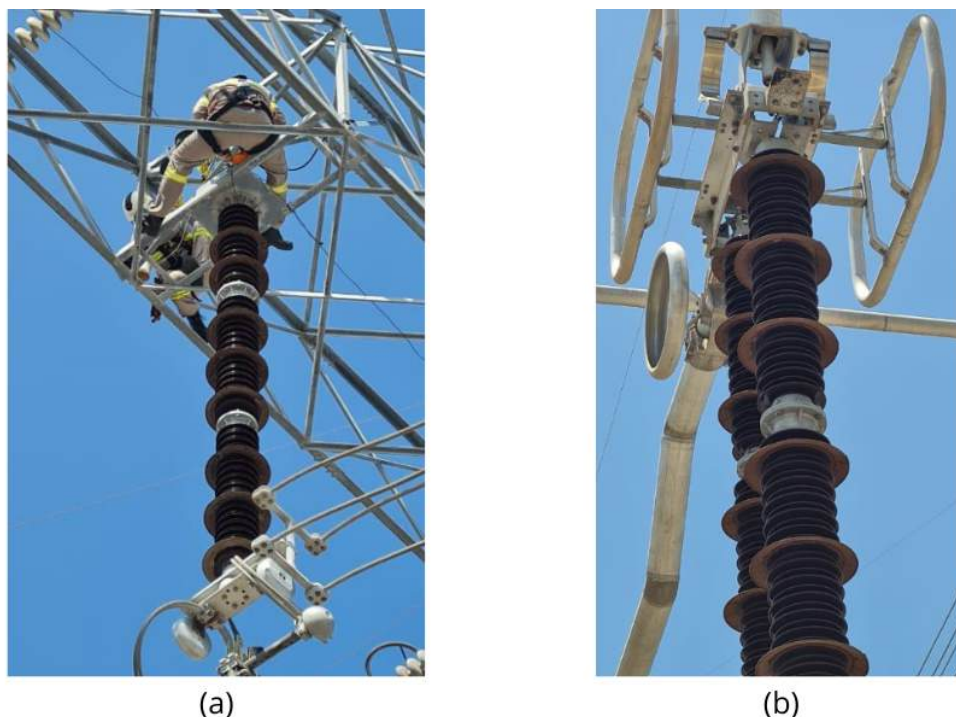


Figura 99 – Instalação do módulo de transmissão do monitor. (a) Processo de instalação; (b) Detalhe do equipamento ao qual foi instalado o monitor

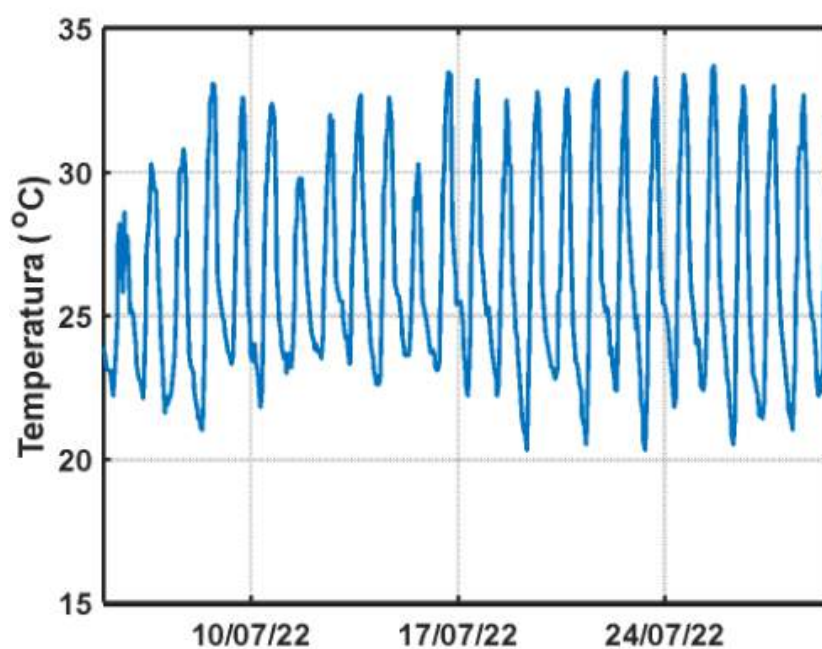


Figura 100 – Dados obtidos para a medição de temperatura na subestação A

seu perfil é similar ao das demais fases, o que indica uma consistência no desempenho do isolamento. Ao analisar o padrão da corrente de fuga, também é possível identificar dois picos de leitura, o primeiro ocorrendo pouco depois das 10h00 da manhã e o segundo por volta das 14h00. Este padrão se assemelha às curvas de consumo de energia, incidência solar e temperatura, sugerindo que o aumento da corrente durante esse período pode estar

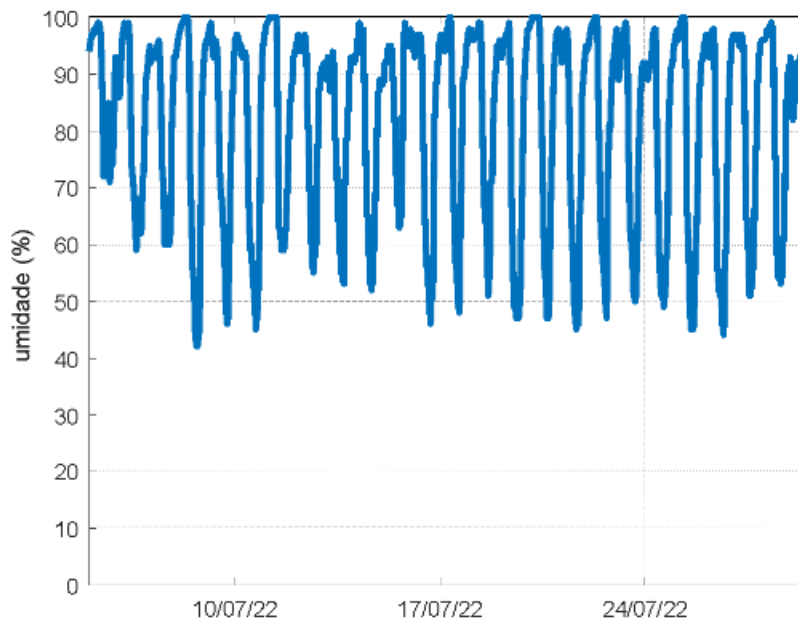


Figura 101 – Dados obtidos para a medição de umidade na subestação A

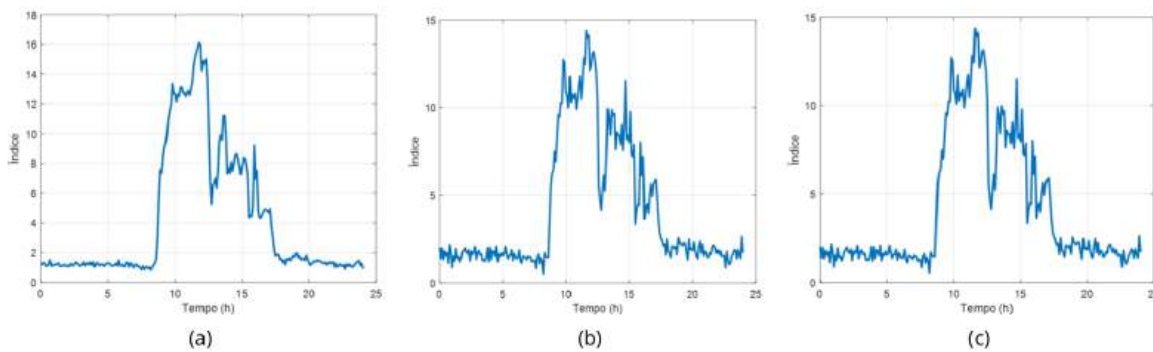


Figura 102 – Comportamento médio da corrente de fuga. (a) Fase A; (b) Fase B; (c) Fase C.

correlacionado com tais variáveis.

Além disso, tendo em vista a relação entre a variável de corrente de fuga e variáveis ambientais como umidade e quantidade de partículas de poluição, indica-se a trabalhos futuros a análise de correlação entre esta grandeza e tais variáveis ambientais. Desta forma, será possível observar como tais partículas afetam as características elétricas dos equipamentos, por exemplo.

A partir das medições realizadas pelo sistema de monitoramento de variáveis elétricas, também foi possível construir o gráfico da [Figura 103](#), que apresenta a média obtida para o nível de descargas parciais medidas ao longo do dia. A quantidade de descargas parciais foi calculada conforme apresentado anteriormente no [Capítulo 4](#).

Com base na [Figura 103](#), nota-se que há uma maior concentração de descargas parciais no período noturno, entre 18h00 da noite e 06h00 da manhã. Esta maior concen-

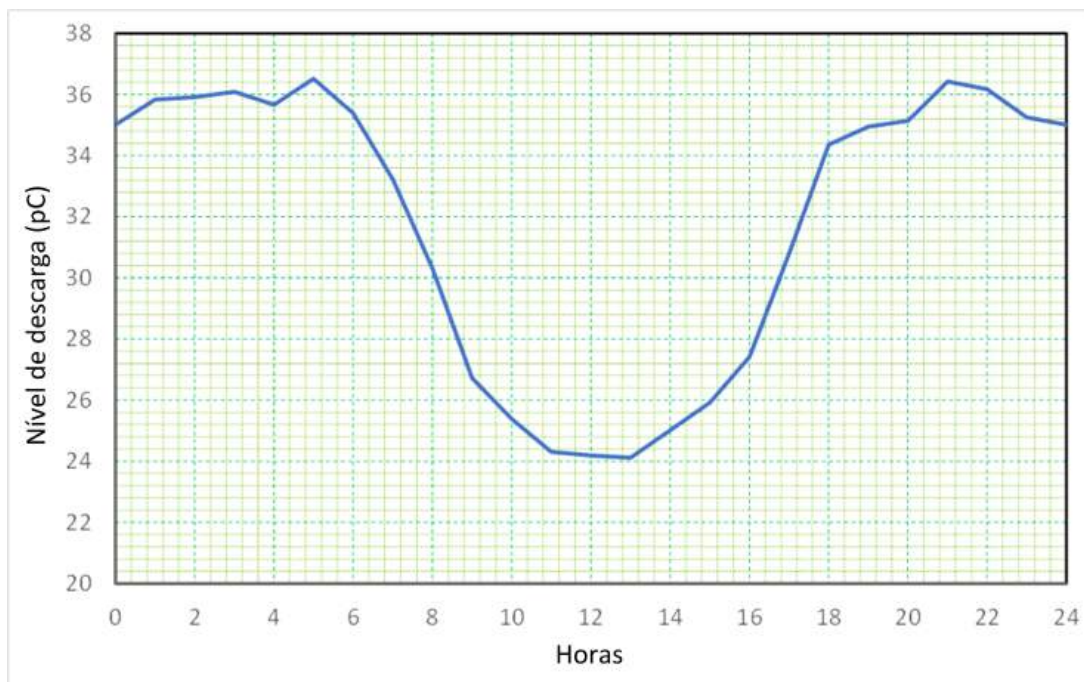


Figura 103 – Níveis de descargas parciais obtidos para medições na subestação A

tração pode estar relacionada com uma maior umidade relacionada com o período noturno, ou com a presença de orvalho nestes horários, condições que facilitam a ocorrência de descargas parciais, conforme visto no [Capítulo 2](#).

Conforme destacado na [subseção 5.2.2](#), todos os dados coletados estão sendo armazenados localmente em um banco de dados do tipo MariaDB. A coleta de dados é realizada de modo periódico, bem como a análise do funcionamento do sistema de monitoramento, de modo a garantir seu funcionamento ininterrupto. A [Figura 104](#) apresenta um detalhe dos dados coletados e armazenados no banco de dados.

A imagem mostra a interface de um banco de dados com a seguinte estrutura:

- information\_schema
- monitor (496,0 KiB)
  - dados\_adc (464,0 KiB)
  - dados\_climaticos (32,0 KiB)
- mysql
- performance\_schema
- sys

Aberto no monitor, o seguinte conjunto de dados é exibido:

ID	Time	ADC0_1	ADC1_1	ADC2_1	ADC3_1	ADC0_2	ADC1_2	ADC2_2
3.466	2023-09-04 13:28:44	717	735	278	748	754	761	70
3.467	2023-09-04 13:28:44	717	739	278	749	754	761	70
3.468	2023-09-04 13:28:44	712	737	278	743	754	761	70
3.469	2023-09-04 13:28:44	716	736	278	750	754	761	70
3.470	2023-09-04 13:28:44	716	732	278	747	754	761	70
3.471	2023-09-04 13:28:44	715	735	278	746	755	761	70
3.472	2023-09-04 13:28:44	716	734	278	749	754	761	70
3.473	2023-09-04 13:28:44	717	736	278	746	754	761	70
3.474	2023-09-04 13:28:45	712	737	278	749	754	761	70
3.475	2023-09-04 13:28:45	716	736	278	747	754	761	70
3.476	2023-09-04 13:28:55	711	738	278	748	754	761	70
3.477	2023-09-04 13:28:55	714	737	278	746	754	761	70
3.478	2023-09-04 13:28:55	707	737	278	746	754	761	70
3.479	2023-09-04 13:28:55	716	736	278	748	754	761	70
3.480	2023-09-04 13:28:55	717	735	278	747	754	761	70
3.481	2023-09-04 13:28:55	715	735	278	750	754	761	70
3.482	2023-09-04 13:28:55	719	735	278	748	754	761	70
3.483	2023-09-04 13:28:55	715	735	278	742	754	761	70
3.484	2023-09-04 13:28:55	713	738	278	745	754	760	70
3.485	2023-09-04 13:28:55	713	735	278	747	754	761	70
3.486	2023-09-04 13:28:55	718	737	278	744	754	761	70

Figura 104 – Níveis de descargas parciais obtidos para medições na subestação A

### 6.3 Avaliação experimental do sensor de corrente de fuga

Visando avaliar a adequação do sensor de corrente de fuga selecionado para medir essa grandeza, os ensaios laboratoriais descritos detalhadamente no [Capítulo 4](#) foram replicados, com a substituição do sistema de aquisição. Nos ensaios originais, um osciloscópio foi utilizado para aquisitar as formas de onda de corrente e tensão oriundas do circuito de alta tensão. Nesta nova avaliação experimental, o osciloscópio foi substituído pelo sensor de corrente, conforme apresentado nas Figuras 105 e 106, que apresentam respectivamente o circuito experimental de alta tensão montado e o detalhe do sensor de corrente conectado ao circuito para aquisitar a corrente de fuga do isolador.

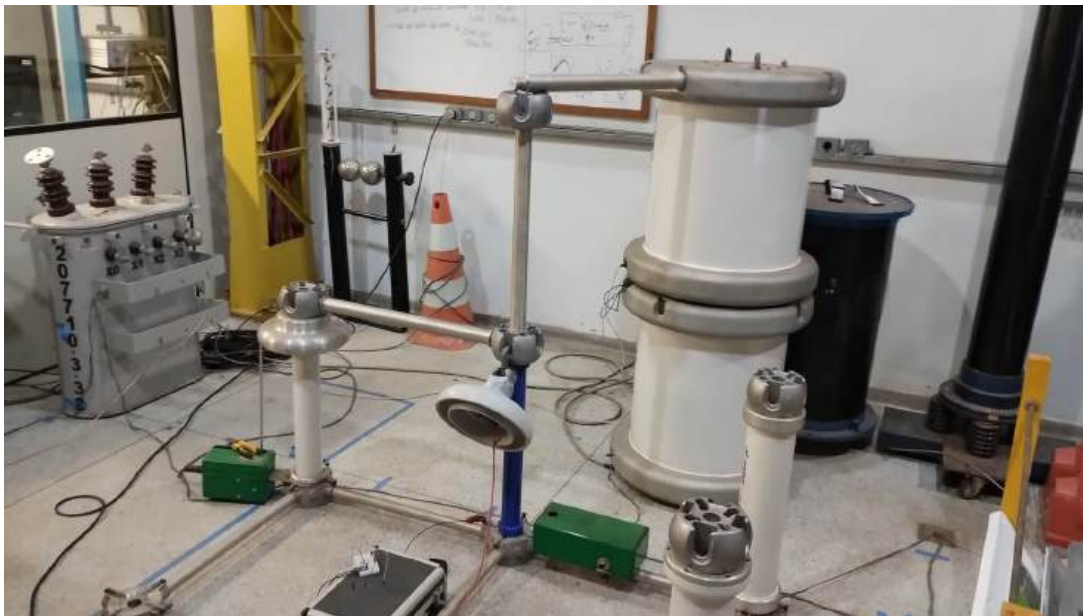


Figura 105 – Circuito experimental de alta tensão para medição da corrente de fuga do isolador

Assim como realizado anteriormente, os ensaios foram executados para o isolador em quatro condições distintas, sendo estas: seco e sujo, úmido e sujo, seco e limpo e úmido e limpo. Além disso, conforme detalhado no [Capítulo 4](#), o nível de tensão do circuito foi variado sistematicamente, de forma que quatro níveis de tensão foram aferidos: 10, 10kV, 17, 20kV, 22, 32kV, 29, 50kV. A corrente de fuga do isolador foi medida durante 5 minutos para cada um desses níveis de tensão. Considerando que o software desenvolvido calcula em média 4,7 valores RMS por segundo, ao todo foram aquisitadas em média 1325 amostras para cada etapa de medição.

Após a medição, os valores de tensão fornecidos na saída do sensor foram transformados no valor da corrente de fuga medida. Essa transformação foi feita a partir da curva do sensor ([Figura 83](#)). Utilizou-se do método de regressão linear para obter a equação que define a relação entre a corrente lida e a tensão de saída do sensor. Assim, foi possível construir os gráficos das correntes de fuga lidas no isolador. Essa equação é dada pela



Figura 106 – Detalhe da conexão do sensor de corrente para medição da corrente de fuga do isolador

relação:

$$V = 252,40 * I - 0,04$$

Por fim, destaca-se que para facilitar a leitura, amplificando o nível da corrente de fuga em duas vezes, o cabo no qual a corrente de fuga foi medida foi transpassado duas vezes no interior do sensor de corrente (conforme visto na [Figura 106](#)), desta forma, todos os resultados apresentados a seguir indicam o dobro da corrente de fuga lida no isolador.

#### 6.3.0.1 Resultados para os isoladores sujos e secos

Os gráficos apresentados nas Figuras [107-110](#) mostram os detalhes dos valores RMS da corrente de fuga do isolador quando este está na condição seca e com poluição. Ressalta-se que essa poluição foi naturalmente acumulada ao longo de um ano de funcionamento do isolador em uma linha de transmissão de alta tensão.

A partir dos gráficos, observa-se que a variável de corrente de fuga para o isolador nessas condições varia de modo aleatório dentro de uma faixa de valores. Os limites dessa faixa aumentam de amplitude conforme aumenta a tensão a qual o isolador está submetido. Para o isolador sob a tensão de 10,10kV, por exemplo, observa-se que o valor da corrente de fuga varia entre 0,42mA e 0,44mA; enquanto que para o nível de tensão de 29,50kV o nível da corrente de fuga varia entre 1,22mA e 1,25mA.

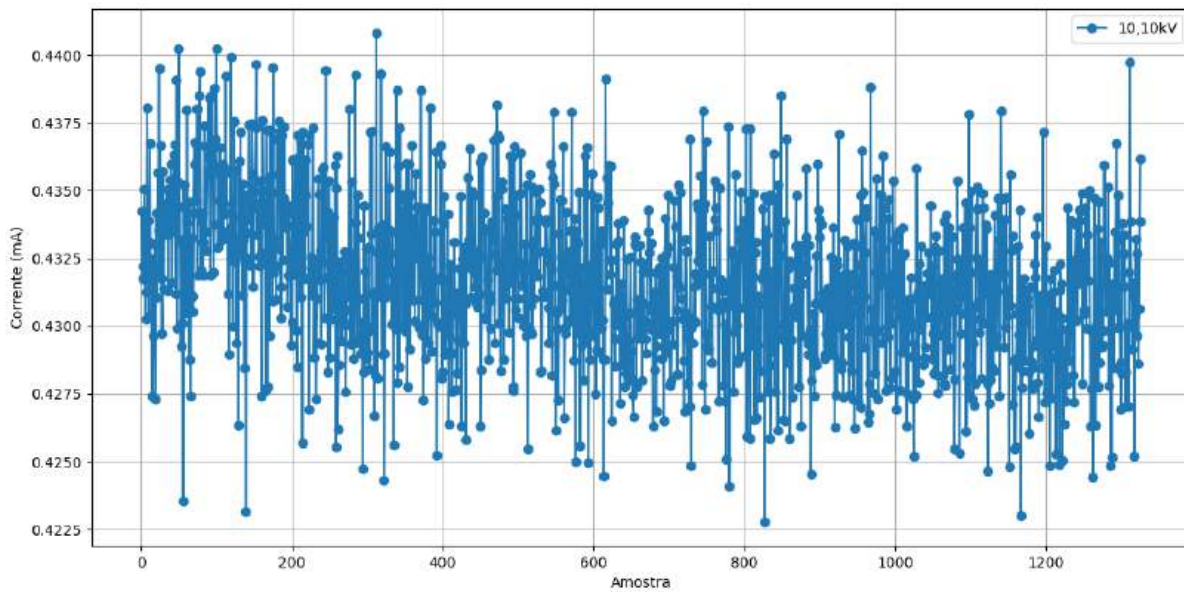


Figura 107 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco

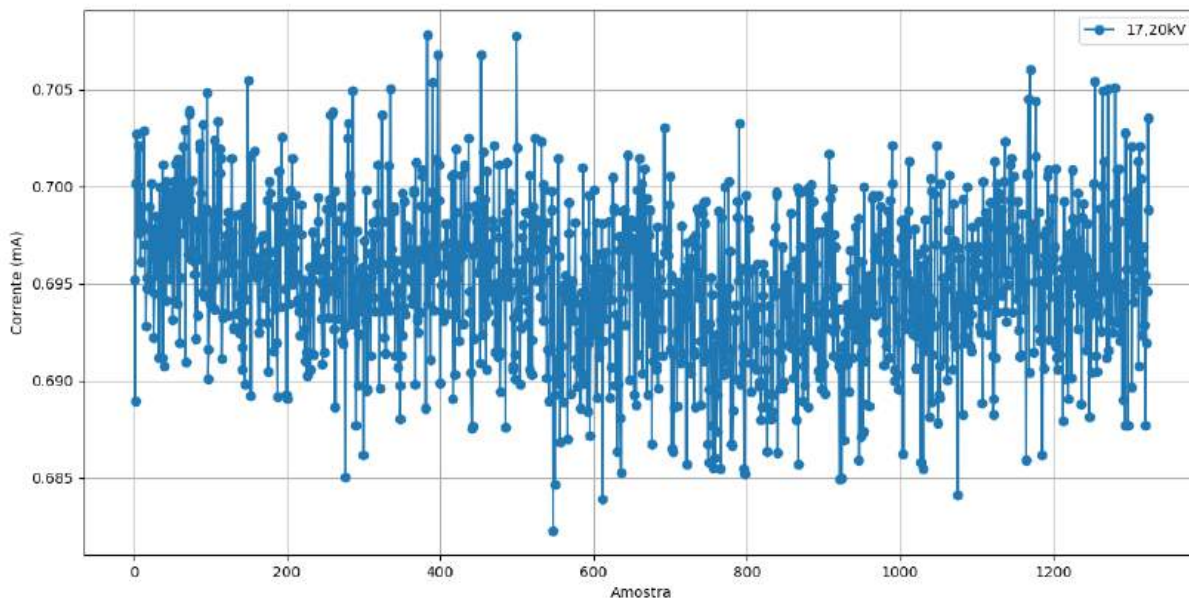


Figura 108 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco

A Figura 111 permite a comparação visual das correntes de fuga do isolador para os diferentes níveis de tensão aos quais este foi submetido. É visível a partir desta figura que, embora os níveis de amplitude desta grandeza variem diretamente com o nível da tensão, a corrente de fuga apresenta um comportamento regular se mantendo estável ao longo do período de aferição.

### 6.3.0.2 Resultados para os isoladores sujos e úmidos

Esta seção apresenta os resultados das medições realizadas para os isoladores contaminados e expostos a umidade artificial. Esta umidade foi adicionada aos isoladores conforme os procedimentos detalhados na Capítulo 4. Ressalta-se que a corrente de fuga do isolador foi aquirada durante 5 minutos para cada nível de tensão e após esse período,



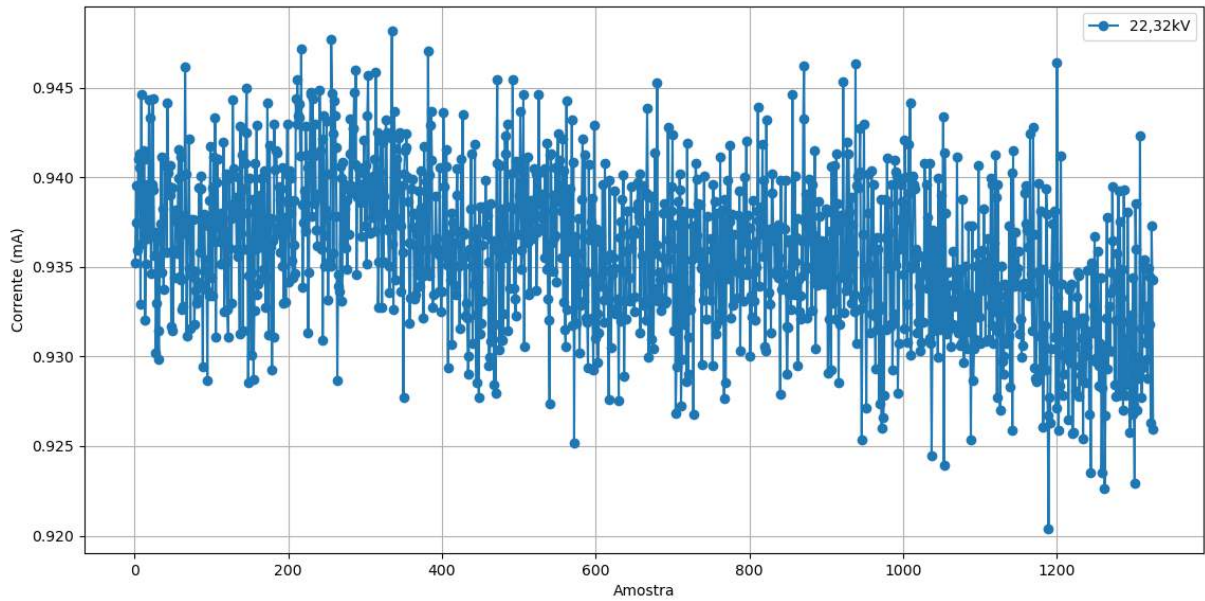


Figura 109 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco

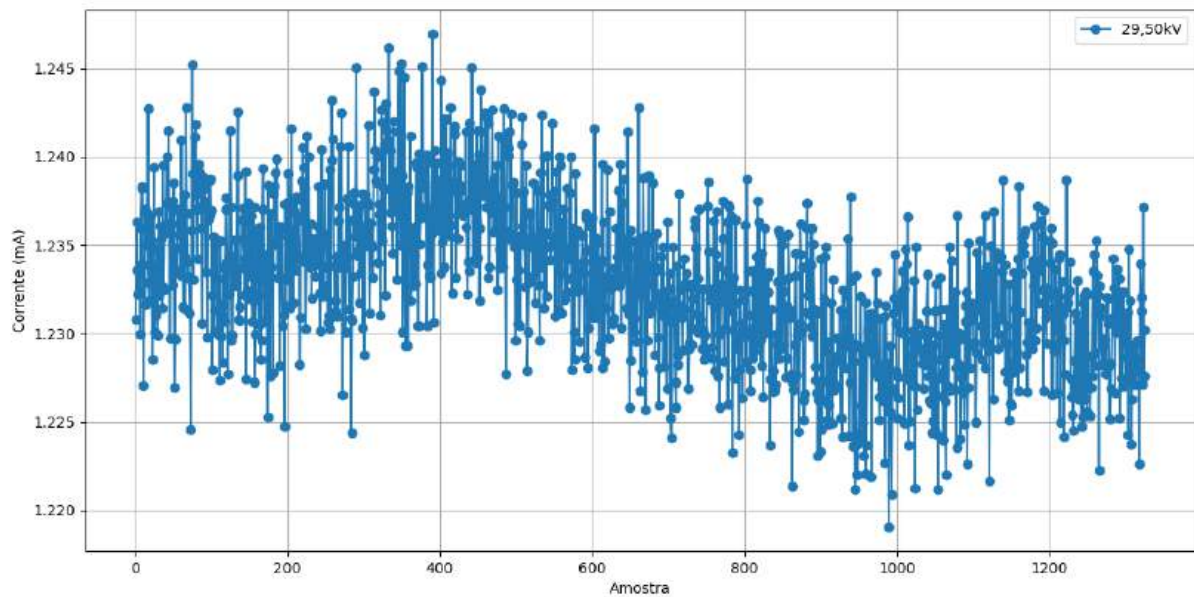


Figura 110 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco

a umidade foi novamente aplicada às superfícies superior e inferior do isolador. Os gráficos das Figuras 112-115 apresentam os sinais medidos para os valores RMS da corrente de fuga do isolador nessas condições.

Assim como para o isolador seco, a variável de corrente de fuga varia dentro de uma faixa de valores, sendo que a faixa para o menor nível de tensão é de 0,58mA a 0,615mA e para o maior nível de tensão é de 1,5mA a 3 mA. Desta forma, verifica-se um aumento expressivo dos níveis de corrente de fuga conforme eleva-se os níveis de tensão do isolador sujo e úmido. Além disso, também observa-se um aumento significativo frente aos valores medidos para o isolador sujo e seco submetido aos mesmos níveis de tensão.

A Figura 116 apresenta uma visualização comparativa entre os valores de corrente

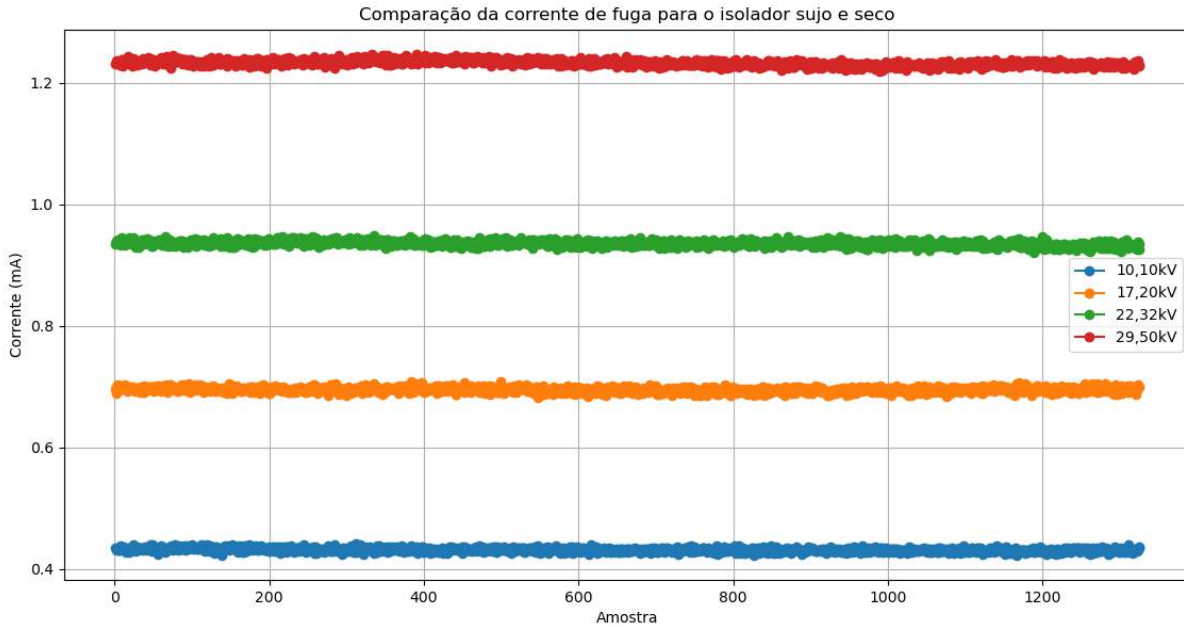


Figura 111 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e seco para os diferentes níveis de tensão

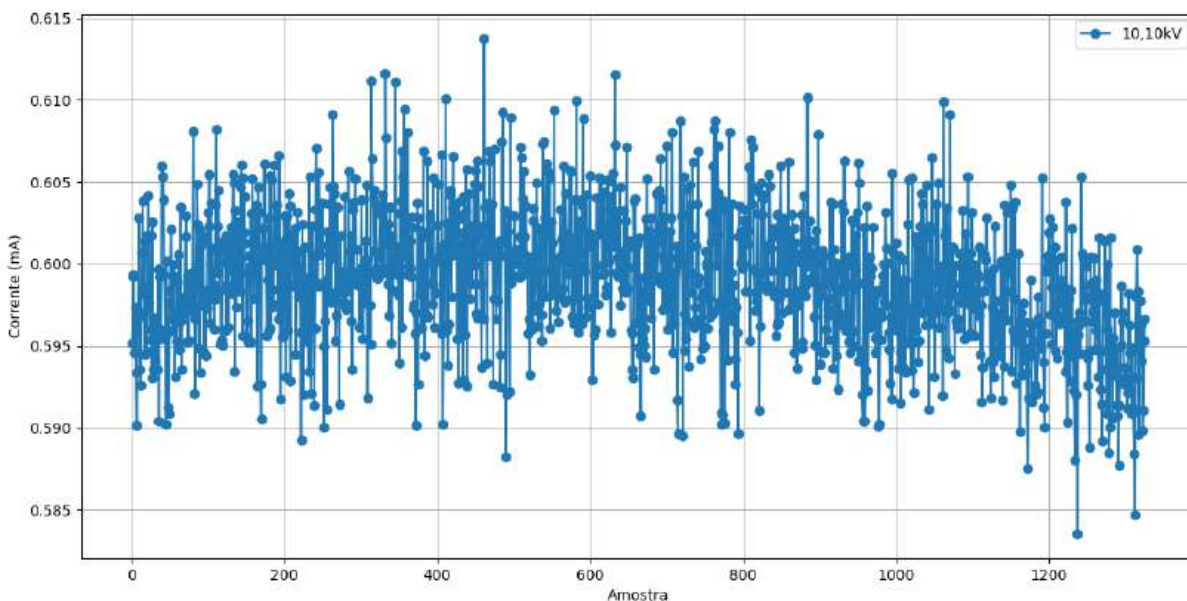


Figura 112 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido

de fuga medidos para os diferentes níveis de tensão. É interessante observar que, ao contrário do observado para o isolador seco, quando há a presença de umidade verifica-se uma tendência decrescente no comportamento da corrente ao longo do tempo. Esse comportamento é mais pronunciado para o nível mais elevado de tensão, porém também é observado nos níveis inferiores. Essa característica pode estar relacionada ao processo de aquecimento que o isolador sofre como consequência da passagem de corrente de fuga em sua superfície. Conforme explicado na [Capítulo 2](#), a passagem de corrente de fuga eleva a temperatura da superfície do isolador, o que promove a evaporação da umidade e a consequente redução da corrente de fuga.

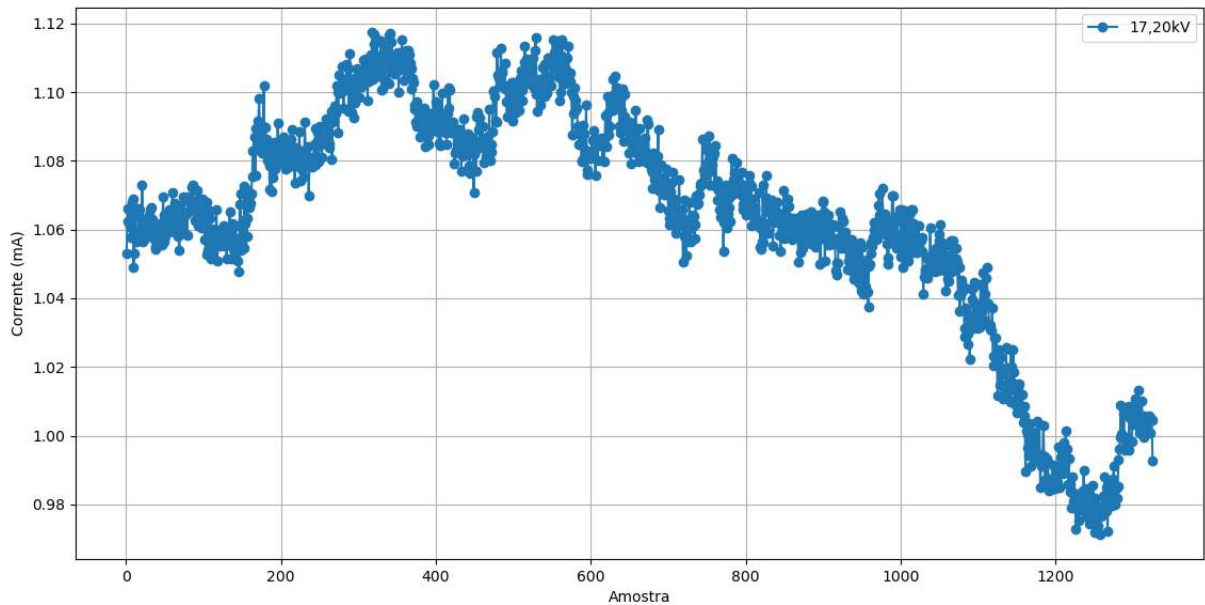


Figura 113 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido

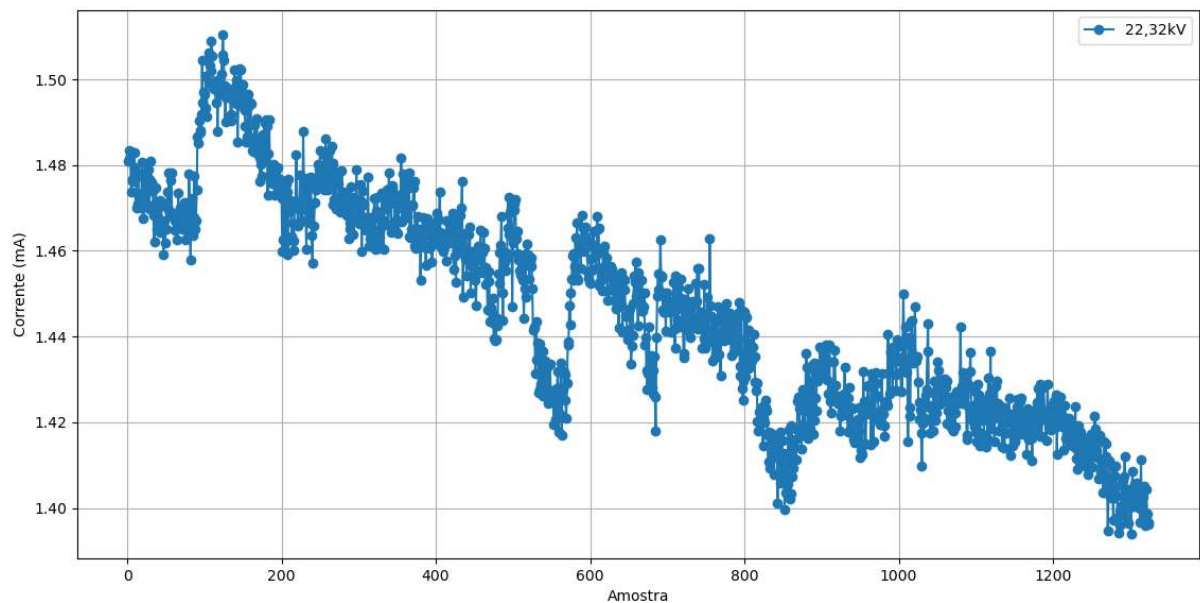


Figura 114 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido

### 6.3.0.3 Resultados para os isoladores limpos e secos

Após a remoção da sujidade da superfície do isolador, este foi avaliado novamente para os diferentes níveis de tensão durante o período de 5 minutos. Os resultados da medição da corrente de fuga são apresentados nos gráficos das Figuras 117-120.

Para o menor nível de tensão, os valores de corrente de fuga observados variam entre 0,34mA e 0,375mA. Em relação ao maior nível de tensão, tais valores variam entre 1,19mA e 1,24mA. Conforme esperado, esses valores são inferiores aos respectivos valores observados para o isolador contaminado e em condição seca. Assim, verifica-se que a remoção da camada de contaminantes da superfície do isolador acarreta na diminuição dos níveis de corrente de fuga fluindo pela superfície deste. Esta análise é esperada e justifica,

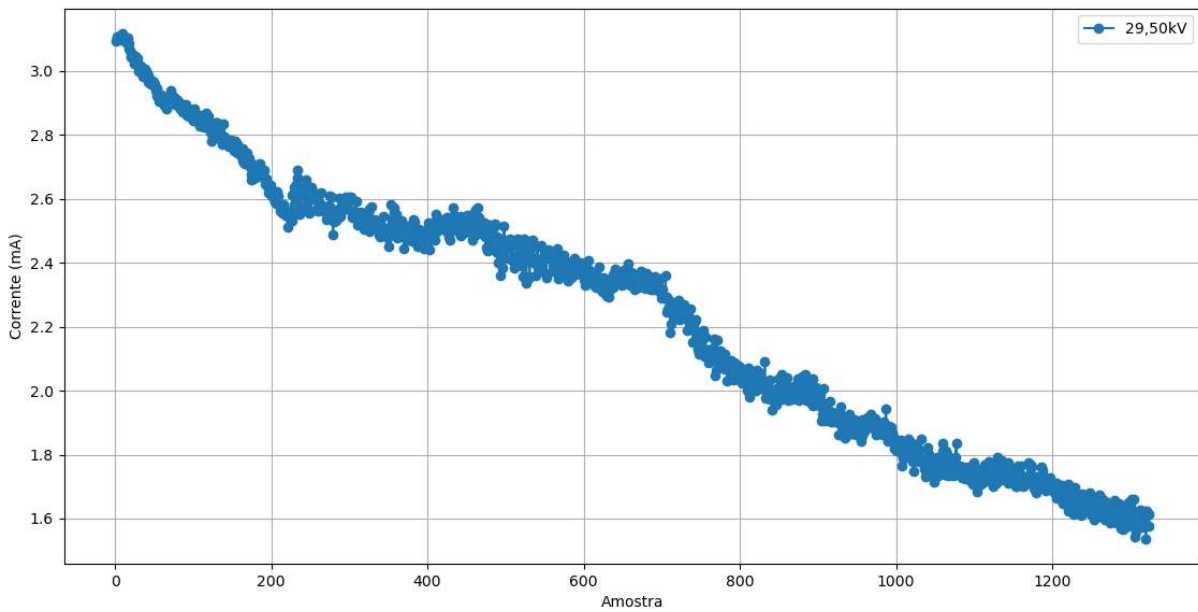


Figura 115 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido

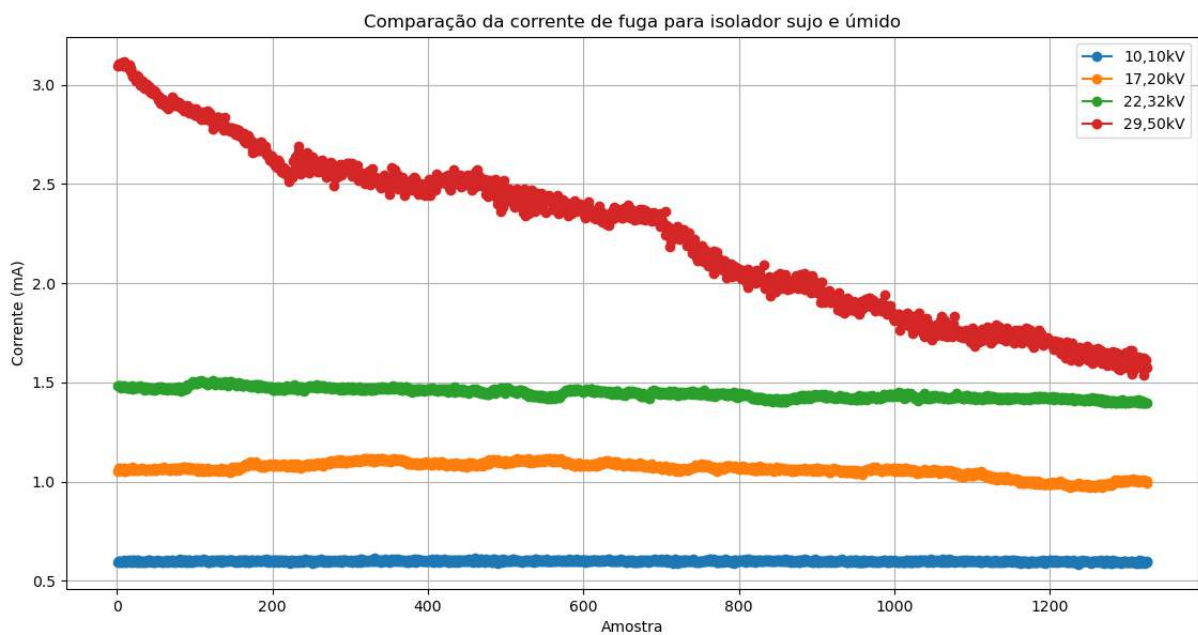


Figura 116 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador sujo e úmido para os diferentes níveis de tensão

por exemplo, o processo de lavagem periódica que é realizado em isoladores de linhas de transmissão como parte de planos de manutenção.

Ademais, assim como verificado para os isoladores contaminados e secos, o comportamento da corrente de fuga ao longo do tempo foi basicamente constante, como pode-se observar na [Figura 121](#).

#### 6.3.0.4 Resultados para os isoladores limpos e úmidos

Por fim, são apresentados os resultados das medições realizadas para os isoladores limpos e com umidade artificial. Novamente, ressalta-se que esta umidade foi adicionada

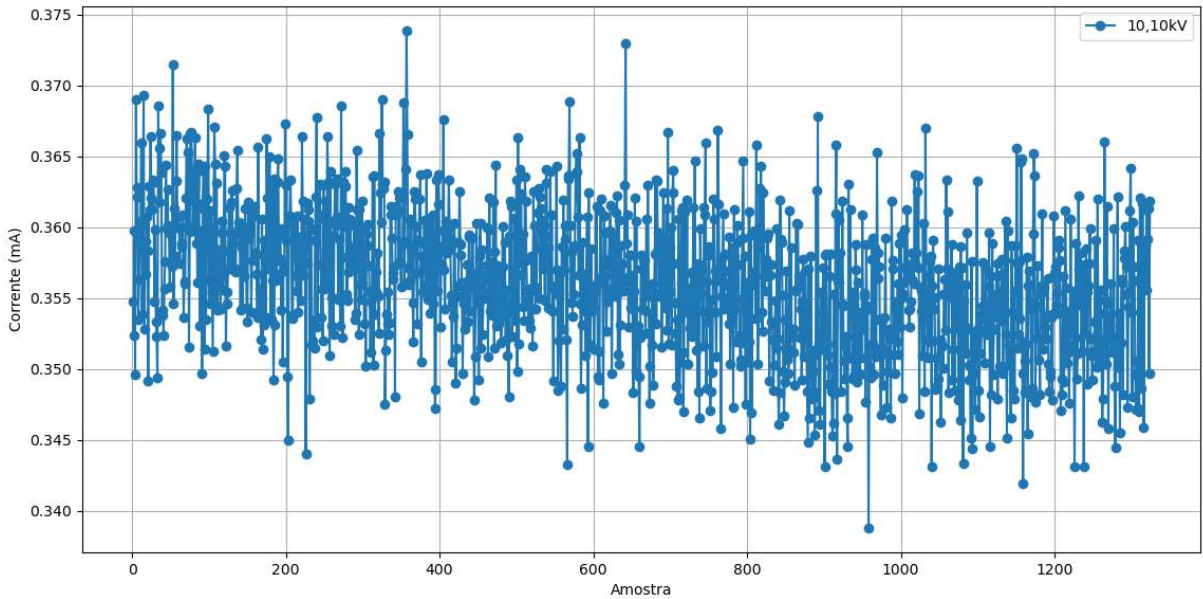


Figura 117 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco

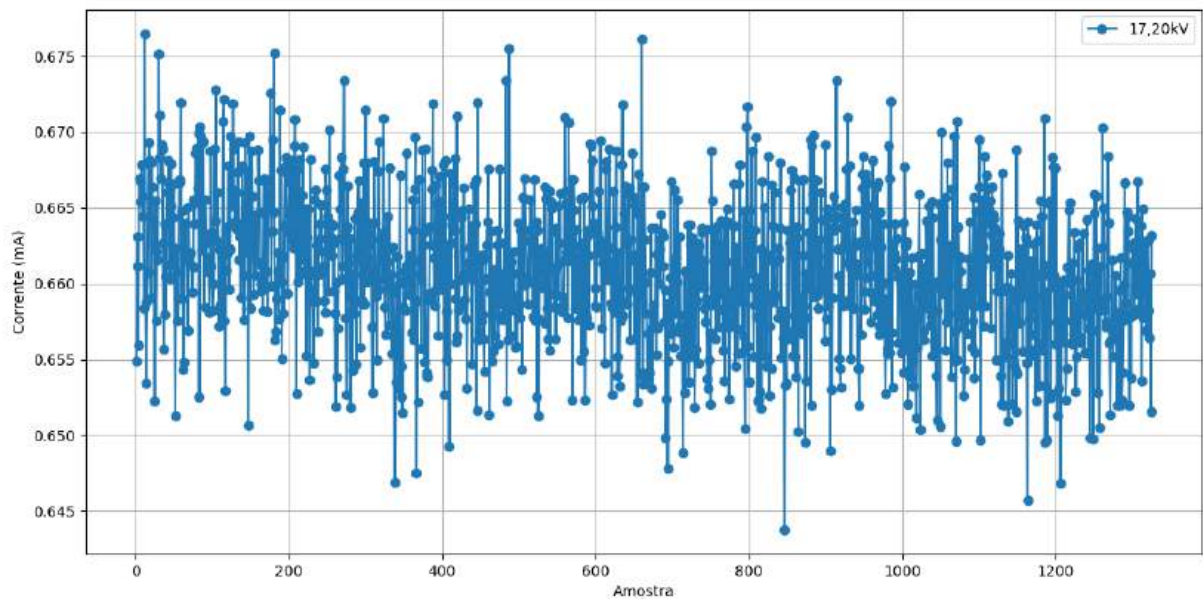


Figura 118 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco

aos isoladores após o encerramento de cada processo de aquisição. As Figuras 122-125 apresentam os resultados de tais medições.

Similarmente ao que foi verificado para os isoladores em condição seca, o isolador limpo e úmido também apresenta níveis de amplitude de corrente de fuga inferiores em relação aos níveis verificados para o isolador contaminado e úmido. Para o menor nível de tensão, essa grandeza varia entre 0,41mA e 0,5mA, enquanto que, para o maior nível de tensão, os valores variam entre 1,2mA a 1,8mA. Diferentemente dos outros casos avaliados, para essa condição o isolador apresentou um comportamento anômalo da corrente de fuga quando submetido à uma tensão de 22,32kV. Este comportamento aparenta ser um offset ocasionado por um erro de medição. Por fim, destaca-se que, embora verifique-se um aumento significativo em relação aos níveis de corrente de fuga do isolador limpo e

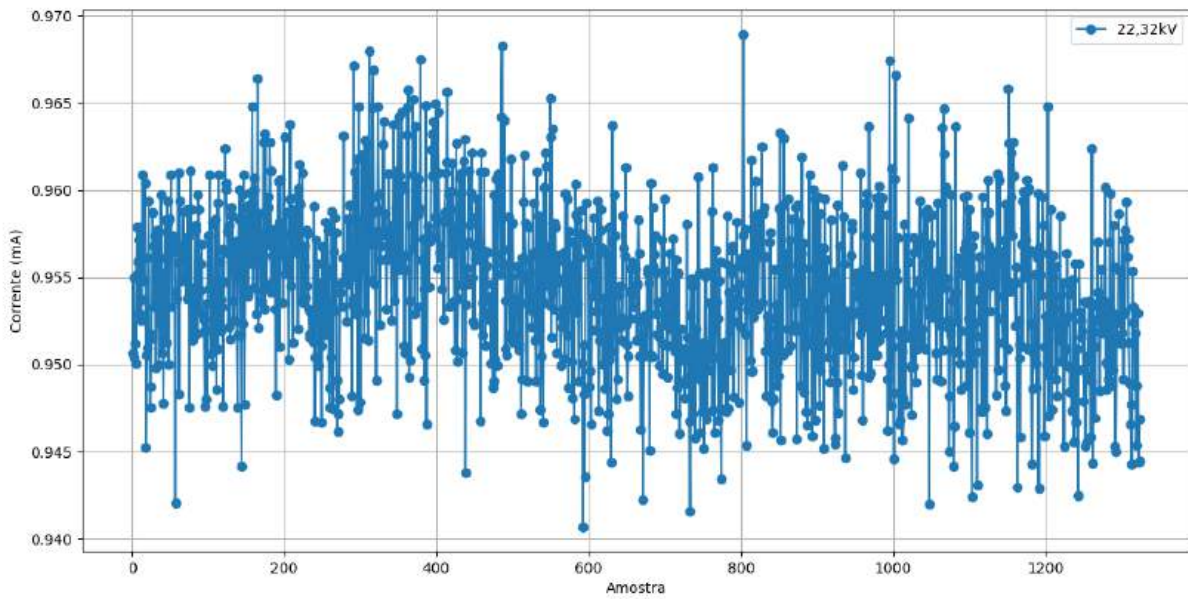


Figura 119 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco

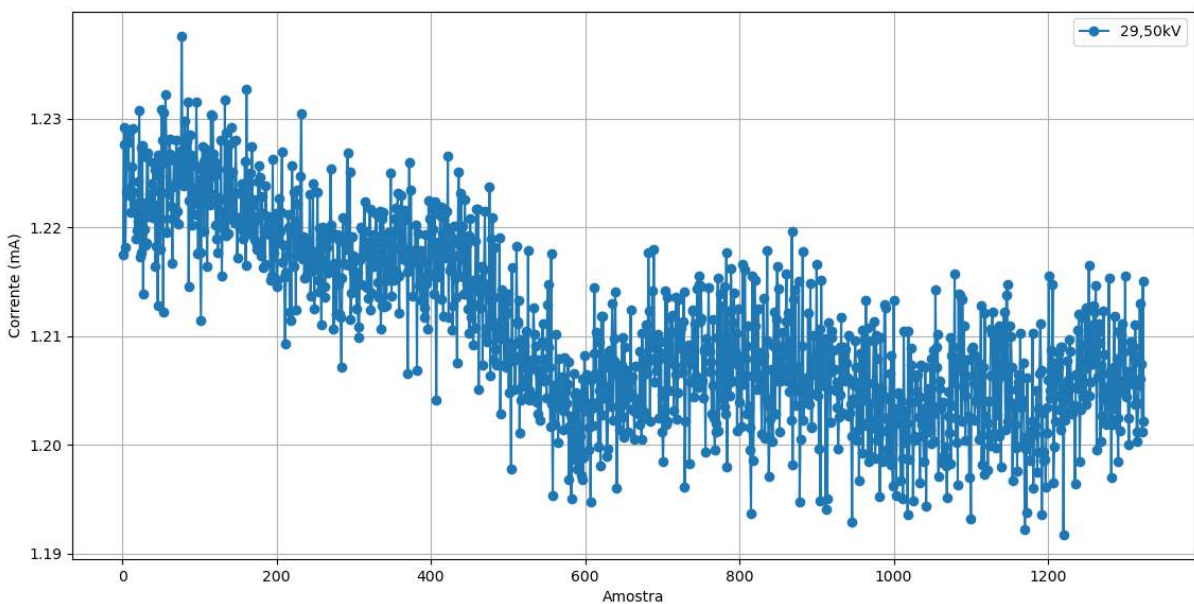


Figura 120 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco

seco, estes permanecem inferiores aos níveis observados para o isolador sujo nas mesmas condições de umidificação.

A partir da [Figura 126](#) verifica-se que a corrente de fuga do isolador limpo e úmido também apresenta uma tendência descendente com o tempo, sendo esta mais acentuada para os níveis de tensão mais elevados. De acordo com o explicado anteriormente, esse comportamento está relacionado ao processo de secagem da superfície do isolador, que reduz o nível de corrente de fuga ao longo do tempo.

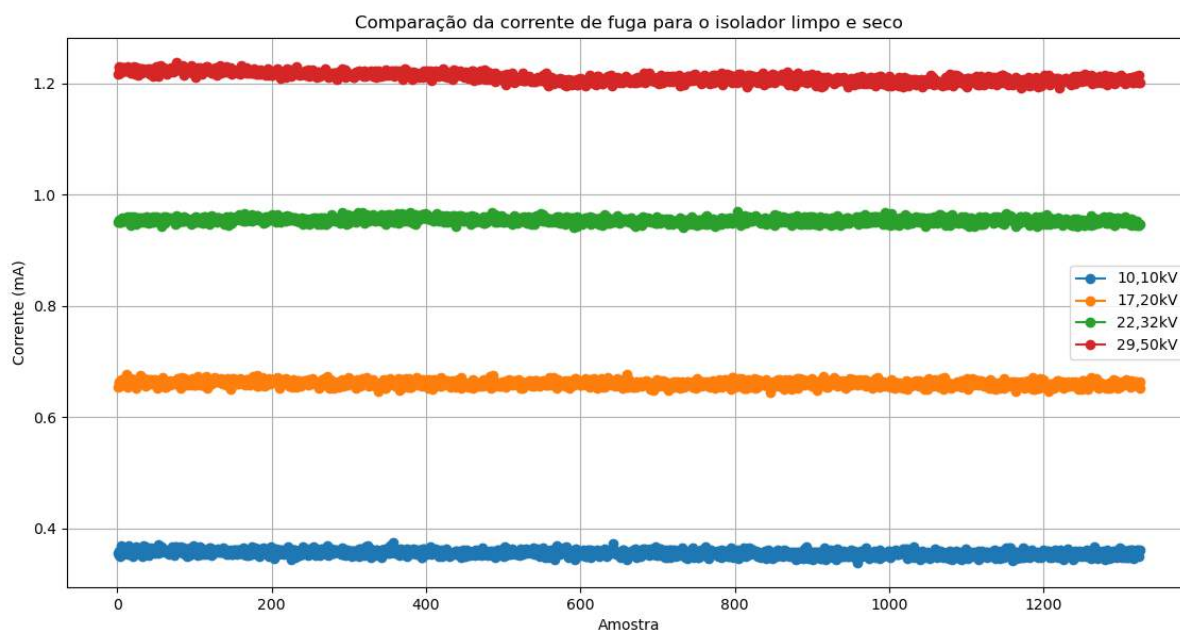


Figura 121 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e seco para os diferentes níveis de tensão

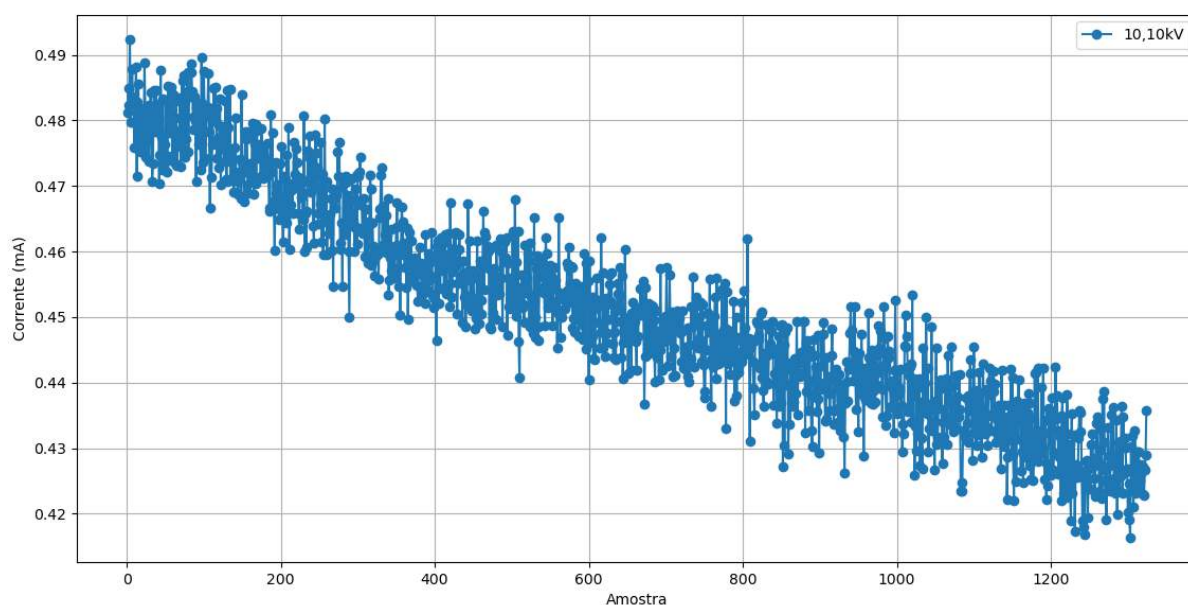


Figura 122 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido

#### 6.3.0.5 Comparação dos resultados experimentais

A [Tabela 6](#) sumariza os resultados obtidos experimentalmente para a medição da corrente de fuga nos isoladores. A partir da análise desta tabela reforça-se as discussões apresentadas anteriormente.

#### 6.3.0.6 Resultados para os ensaios de longa duração

Além dos ensaios destacados anteriormente, outros dois ensaios foram realizados. Estes ensaios tiveram uma duração maior para permitir observar o comportamento de decaimento da corrente verificado para os isoladores em condições úmidas. O primeiro

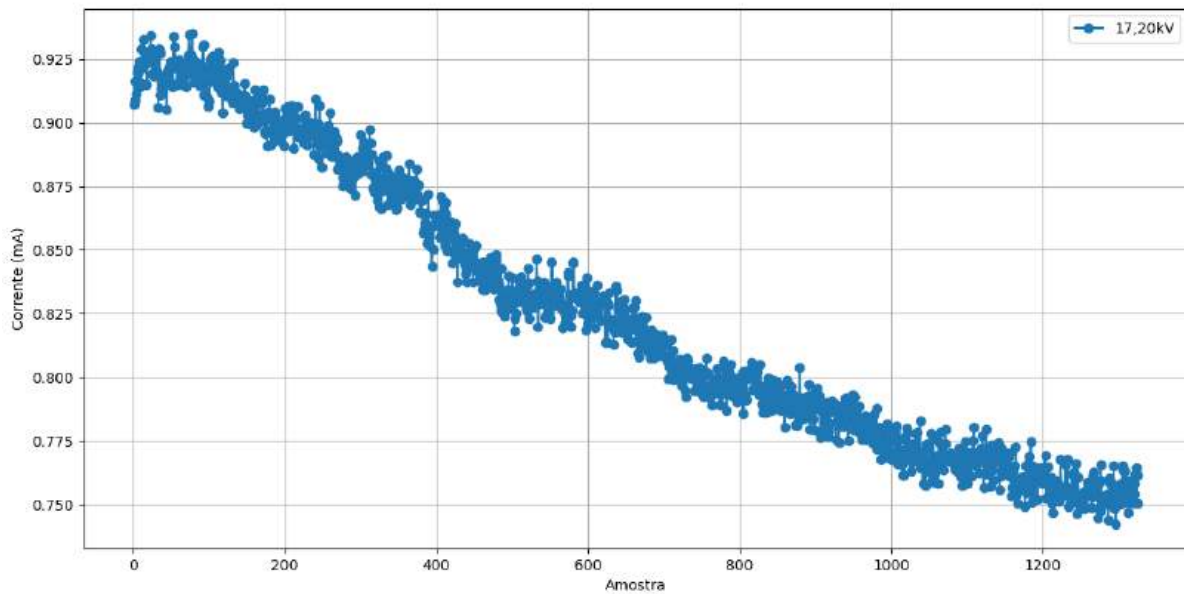


Figura 123 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido

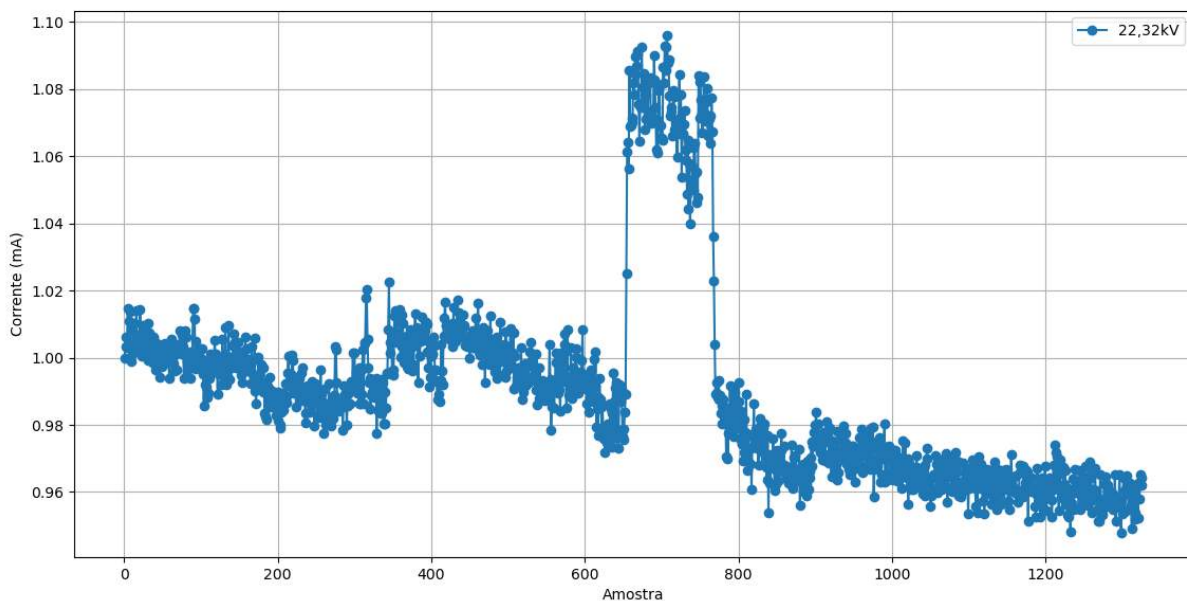


Figura 124 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido

consistiu na análise do isolador em condição seca para seu estado com e sem contaminação. Este ensaio durou 5 minutos, assim como os anteriores, e consistiu no aumento gradativo do nível de tensão até atingir o nível máximo de tensão (29,50kV), que foi mantido por aproximadamente 3 minutos. Os resultados deste ensaio são apresentados na [Figura 127](#).

O segundo ensaio consistiu em um ensaio de longa duração e foi realizado com o isolador úmido, em suas condições com e sem contaminação, visando avaliar o decaimento do nível da corrente de fuga observado para os ensaios anteriores. Este ensaio foi realizado ao longo de 30 minutos, com os instantes iniciais sendo referentes ao aumento gradativo da tensão de ensaio até o nível máximo. Os resultados desse ensaio são apresentados na [Figura 128](#).



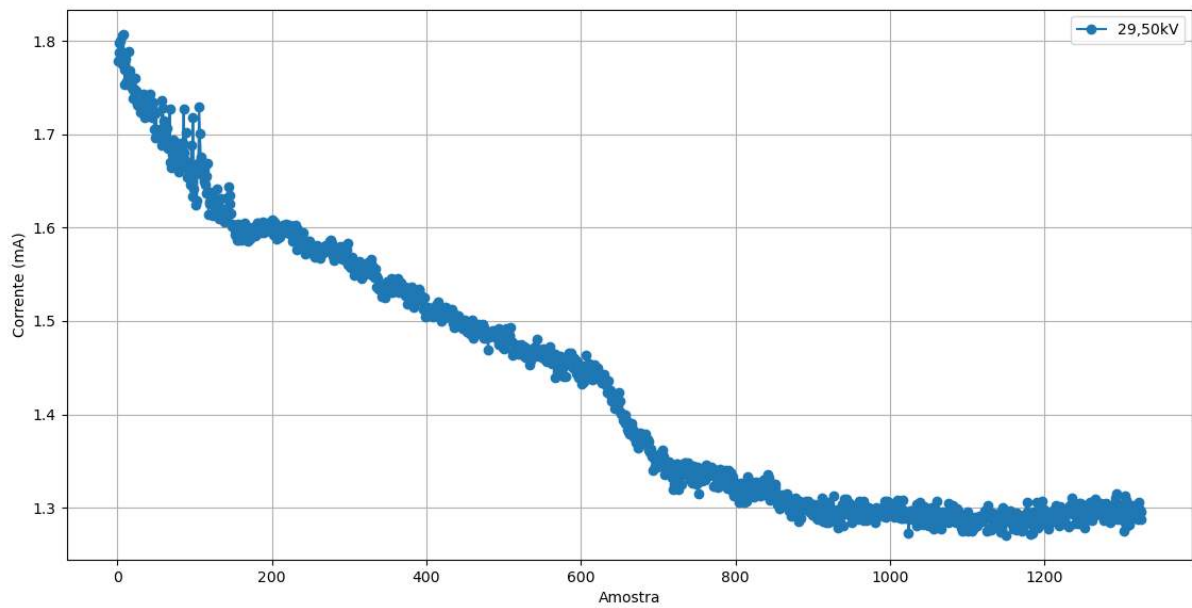


Figura 125 – Valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido

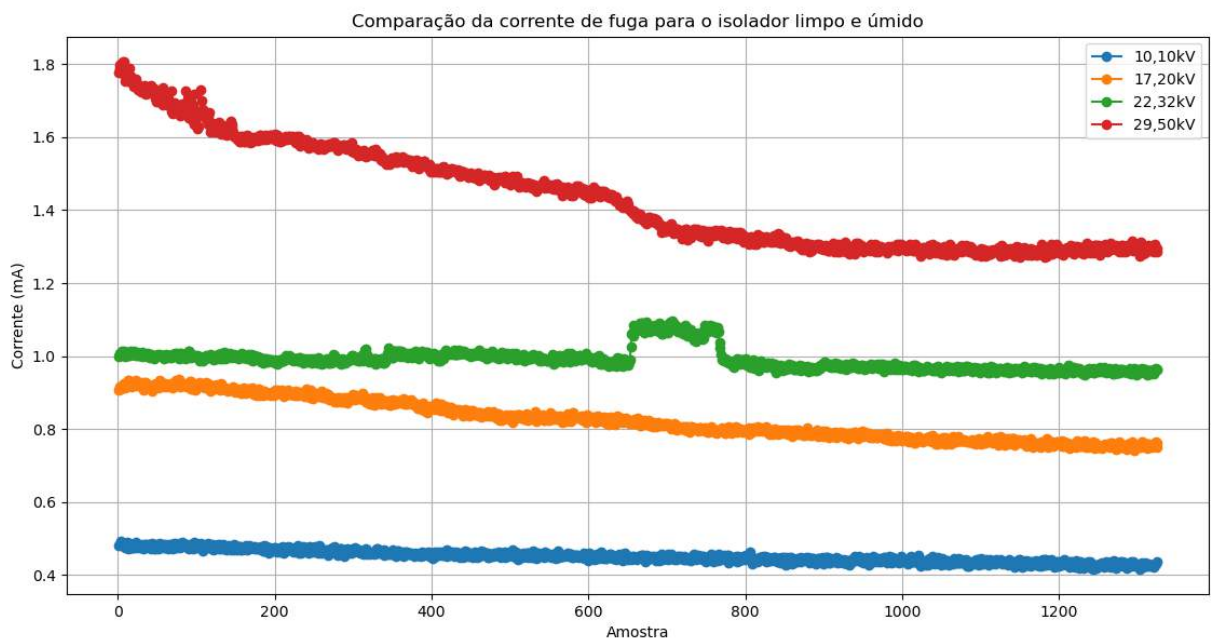


Figura 126 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador limpo e úmido para os diferentes níveis de tensão

Conforme visto para os ensaios individuais, no caso do isolador úmido, verifica-se um decaimento dos níveis de corrente de fuga com o passar do tempo, comportamento associado com o processo de secagem que ocorre na superfície do isolador. Um aspecto importante a ser ressaltado é que o isolador em sua condição limpa apresenta inicialmente níveis de corrente de fuga elevados similares aos níveis do isolador contaminado, todavia, verifica-se que após o decaimento, os níveis de corrente do isolador limpo se estabilizam em níveis inferiores aos do isolador contaminado. Além disso, o decaimento da corrente do isolador limpo ocorre de modo mais acelerado do que o verificado para o isolador contaminado.

Tabela 6 – Sumarização dos resultados da corrente de fuga do isolador sob diferentes níveis de tensão

Condição do isolador	Nível de tensão							
	10,10 kV		17,20 kV		22,32 kV		29,50 kV	
	Min (mA)	Máx (mA)	Min (mA)	Máx (mA)	Min (mA)	Máx (mA)	Min (mA)	Máx (mA)
Sujo e seco	0,42	0,44	0,68	0,71	0,92	0,95	1,22	1,25
Sujo e úmido	0,58	0,61	0,97	1,12	1,39	1,51	1,53	3,12
Limpo e seco	0,34	0,37	0,64	0,68	0,94	0,97	1,19	1,23
Limpo e úmido	0,41	0,49	0,74	0,93	0,95	1,10	1,30	1,81

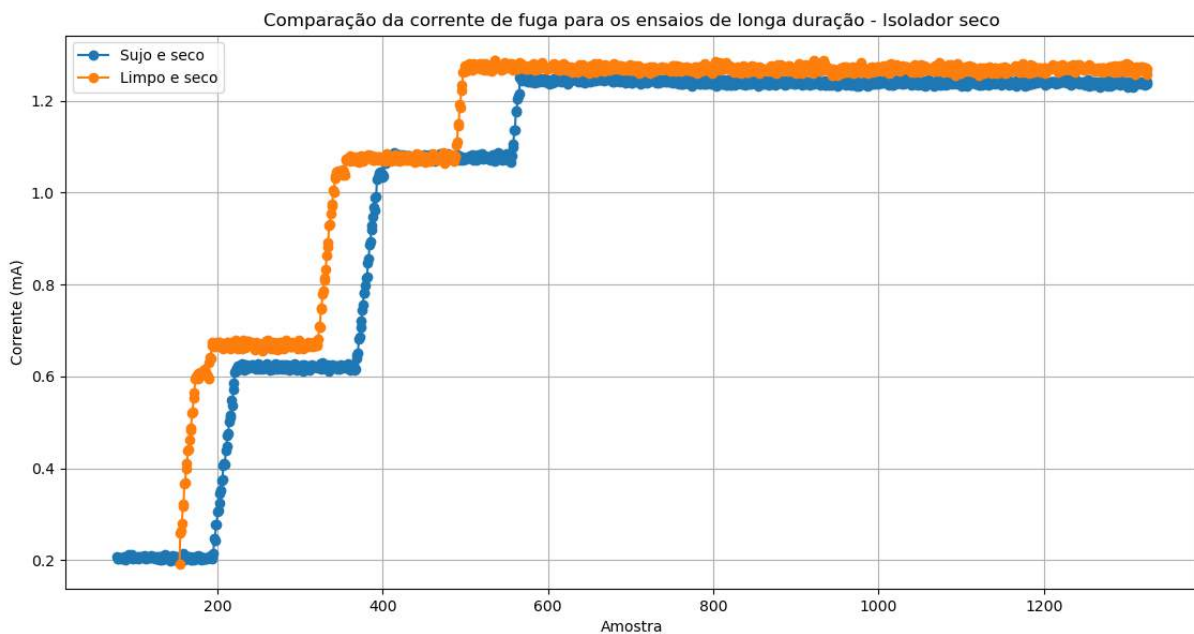


Figura 127 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador seco para o ensaio de longa duração

Por fim, destaca-se que a partir da análise dos resultados, é possível inferir o mesmo comportamento verificado para as análises apresentadas no [Capítulo 4](#), nas quais avaliou-se que, mesmo após a remoção da camada de contaminantes dos isoladores, o desempenho destes continua sendo negativamente influenciado pela presença da umidade, aspecto refletido no aumento expressivo da condutividade de sua superfície quando umidificada. No caso destes ensaios, esta degradação do desempenho é refletida no aumento expressivo da corrente de fuga do isolador limpo quando este é umidificado. Dessa forma, reforça-se a hipótese levantada anteriormente de que o acúmulo contínuo de poluição na superfície do isolador pode comprometer suas características isolantes, especialmente quando exposto à umidade. Isso destaca a necessidade de métodos otimizados para o planejamento da manutenção desses equipamentos, evitando o acúmulo continuado de poluição em sua

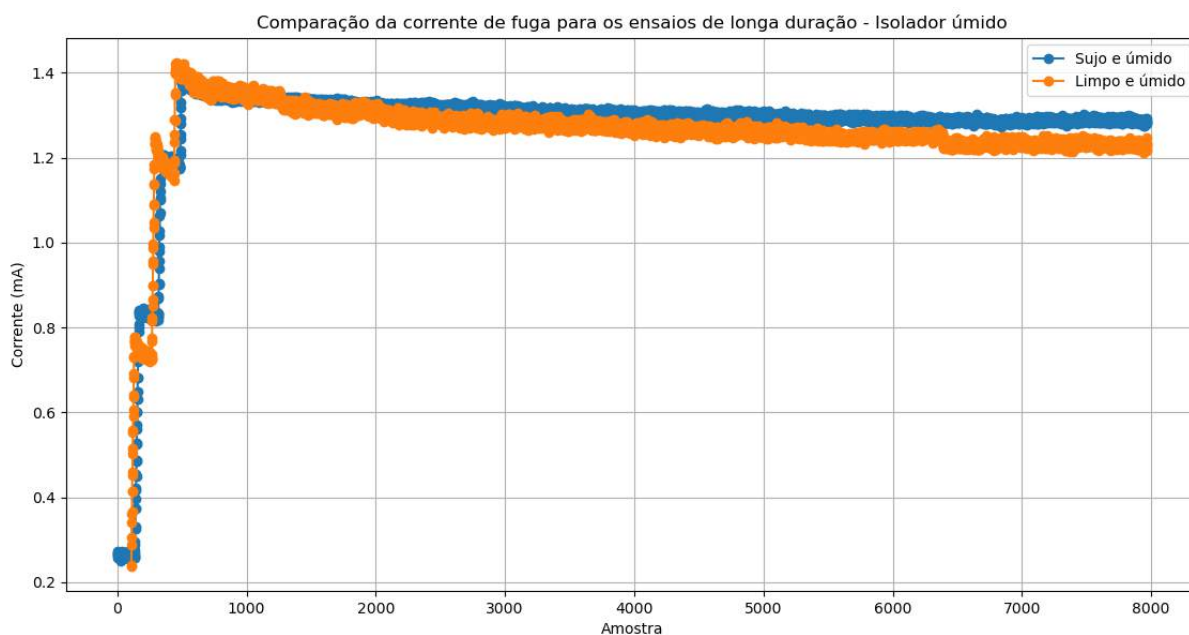


Figura 128 – Comparação dos valores RMS da corrente de fuga do isolador úmido para o ensaio de longa duração

superfície.

#### 6.4 Trabalhos Futuros

Esta seção apresenta sugestões de trabalhos futuros que podem ser realizados a partir do uso dos dados coletados pelo monitor de condição de isolamento desenvolvido neste projeto de doutorado. A principal aplicação dos dados consiste no uso em conjunto com métodos de aprendizado de máquinas, tendo em vista que tais métodos se beneficiam enormemente de um conjunto robusto e expressivo de dados, como o fornecido pelo monitor.

Um exemplo de aplicação consiste na criação de modelos de comportamento normal de equipamentos de alta tensão, utilizando métodos de aprendizado de máquinas treinados com dados de operação normais. Com isso, é possível identificar eventuais situações de operação anômala, quando o modelo passa a apresentar erros que indicam o desvio do comportamento normal.

Outra aplicação possível consiste na criação de modelos de previsão da vida útil de isoladores, considerando os dados experimentais obtidos, que podem ser extrapolados para indicar o perfil de funcionamento do isolador ao longo do tempo. Com base nos dados coletados, por exemplo, pode ser possível verificar o nível de contaminação do isolador a partir da taxa de decaimento da sua corrente de fuga em condições úmidas, pois verificou-se que o isolador limpo apresenta uma taxa de decaimento mais acelerada do que a do isolador contaminado.

Outra aplicação significativa consiste na construção de conjuntos de dados históricos do funcionamento de isoladores e outros equipamentos de alta tensão. É vital a construção

deste tipo de conjunto de dados e sua disponibilização para empresas do setor, visando o aprimoramento das análises de novos empreendimentos em regiões similares, por exemplo. Desta forma, garante-se que novos projetos utilizem equipamentos adequados em relação ao nível de poluição local, visando a preservação do equipamento e o prolongamento de sua vida útil.

## **6.5 Conclusões do capítulo**

Este capítulo apresentou os resultados desta tese de doutorado. Foram dois tipos de resultados principais, os primeiros obtidos pela coleta de dados a partir do sistema de monitoramento desenvolvido e instalado em subestações de alta tensão. Também foram apresentados resultados obtidos em laboratório para a análise do funcionamento do sistema de monitoramento de variáveis elétricas. Tais resultados são condizentes com os resultados apresentados na [Capítulo 4](#) e corroboram com a conclusão de que o acúmulo continuado de poluentes na superfície do isolador acarreta na degradação das características superficiais do isolador quando umidificado, refletindo em uma redução da capacidade isolante mesmo em condições limpas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese de doutorado visou desenvolver um sistema de monitoramento para equipamentos de alta tensão, agregando diferentes elementos sensores e técnicas de aquisição e processamento de dados. Os principais pontos de dificuldade relacionados com esta área e que serviram de motivação para o desenvolvimento desta tese são destacados a seguir:

- Isoladores de alta tensão são elementos cujo funcionamento adequado é essencial para garantir a operação segura de linhas de transmissão. Todavia, tratam-se de equipamentos dispersos ao longo da linha e que operam expostos a diferentes tipos de estresses, sendo o acúmulo de poluentes em sua superfície o principal deles. Esse acúmulo de poluentes degrada significativamente o desempenho desses isoladores ao longo do tempo e reduz sua vida útil;
- Projetos de novos empreendimentos de linhas de transmissão devem idealmente fundamentar-se em dados históricos sobre a contaminação de isoladores, dados que raramente estão disponíveis. Isso permite projetar os isoladores de forma adequada, visando garantir a máxima vida útil do empreendimento.
- A corrente de fuga de isoladores consiste em uma grandeza alternada de amplitude extremamente reduzida e com harmônicos de alta frequência. Portanto, para uma medição precisa dessa grandeza, é essencial empregar um sistema de monitoramento que possa capturar valores dentro da faixa apropriada, evitando assim que os sinais de corrente sejam confundidos com ruídos inerentes à medição. Além disso, é crucial que o sistema de aquisição de dados opere com uma velocidade adequada.

Para contornar tais desafios, esta tese de doutorado trouxe as seguintes contribuições principais:

- Foram realizados e experimentos no laboratório de alta tensão utilizando isoladores naturalmente contaminados. Tais experimentos foram realizados tanto utilizando o osciloscópio como sistema de aquisição, quanto utilizando o sistema de monitoramento de condição de isolamento construído neste trabalho. Em ambos os experimentos, verificou-se que a camada de poluentes na superfície do isolador ocasiona um processo de degradação na performance deste equipamento quando umidificado mesmo após a remoção da sujidade. Isto indica a necessidade da utilização de técnicas de monitoramento contínuo, como a desenvolvida neste projeto, a fim de garantir a otimização dos processos de limpeza desses equipamentos, mitigando a diminuição de sua vida útil;

- Os resultados obtidos também corroboram para a formação de um perfil de funcionamento dos isoladores em diferentes condições de operação ao longo do tempo. A partir dos resultados experimentais, por exemplo, foi possível verificar que os isoladores com menor nível de poluição apresentam um decaimento mais acentuado dos níveis de corrente de fuga ao longo do tempo quando umidificados;
- Através de uma análise abrangente da literatura sobre sensores de corrente, foi possível selecionar uma solução para a medição da corrente de fuga que permite capturar essa grandeza na faixa adequada e com a taxa de aquisição apropriada, levando em conta até mesmo os harmônicos mais altos. Sistemas que permitem esse tipo de medição, como os osciloscópios, por exemplo, não são adequados para medição em campo e por isso foi necessário desenvolver um aparato próprio. Durante o processo de desenvolvimento, constatou-se que a combinação da aquisição da corrente de fuga com a transmissão de dados via rádio LoRa impactava negativamente a taxa de aquisição. Para evitar a perda de informações, optou-se então pelo envio periódico de valores RMS calculados a partir dos dados de corrente de fuga adquiridos a uma taxa mais elevada.;
- Aplicação e validação da utilização da comunicação LoRa em um ambiente de subestação de alta tensão. Os protótipos construídos nesta tese foram instalados em quatro diferentes subestações e apresentaram sucesso nos testes de comunicação. Validando o uso da rede de sensores que pode ser ampliada posteriormente para avaliar novos equipamentos.

Ademais, este documento visou sintetizar os principais conceitos relacionados com o funcionamento de isoladores de alta tensão bem como a operação de sistemas embarcados, de modo a se tornar um documento de referência para trabalhos acadêmicos futuros. Espera-se que a aplicação do sistema de monitoramento desenvolvido permita a construção de conjuntos de dados significativos que possam ser utilizados em trabalhos futuros para mais desenvolvimentos frente ao comportamento de isoladores e equipamentos isolantes de alta tensão. Por fim, tendo em vista a importância do correto funcionamento dos isoladores para a operação segura da linha, espera-se que o sistema de monitoramento de condição desenvolvido funcione como uma ferramenta de apoio para os operadores da rede, otimizando o processo de manutenção e auxiliando na tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. T. **Seleção e dimensionamento de isoladores para alta-tensão para uso sob condições de poluição Parte 1: Definições, informações e princípios gerais**. Rio de Janeiro, 2014.

ADAMU, M. et al. Design of a smart embedded uninterrupted power supply system for personal computers. **International Journal of Embedded Systems and Applications**, v. 2, 12 2012.

AHL, M.; REHM, D. **KIT High Voltage Construction 4.0**. [S.l.], 2018.

ALLIANCE, L. **What is LoRaWAN Specification**. 2015. <<https://loro-alliance.org/about-lorawan/>>.

ANH, T. N. B.; TAN, S.-L. Real-time operating systems for small microcontrollers. **IEEE Micro**, v. 29, n. 5, p. 30–45, 2009.

ARSHAD et al. Ageing and degradation of silicone rubber insulators due to dry band arcing under contaminated conditions. In: **2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.

BORGES, R. W. **Aplicabilidade de sistemas operacionais de tempo real (RTOS) para sistemas embarcados de baixo custo e pequeno porte**. 2011. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

BOSCH SENSORTEC. **BME680: Low Power Gas, Pressure, Temperature & Humidity Sensor**. [S.l.], 2019. 1.3 revision.

CHALACAN, V. H. L. **Performance Evaluation of Long Range (LoRa) Wireless RF Technology for the Internet of Things (IoT) Using Dragino LoRa at 915 MHz**. 2020. Tese (Doutorado) — University of North Florida, 2020.

CIGRE, T. F. . **POLLUTED INSULATORS : A REVIEW OF CURRENT KNOWLEDGE**. [S.l.], 2000.

da Costa, T. R. V. et al. Susceptibility characteristics of 500 kv transmission lines to forced outages caused by wildfires. **Electric Power Systems Research**, v. 209, p. 107995, 2022. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622002103>>.

DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. Lora technology - an overview. In: **2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 284–290.

DIGI-KEY. **Introduction to RTOS - Solution to Part 3 (Task Scheduling)**. 2021. <<https://www.digikey.com/en/maker/projects/introduction-to-rtos-solution-to-part-3-task-scheduling/8fbb9e0b0eed4279a2dd698f02ce125f>>.

EL-HAG, A. Application of machine learning in outdoor insulators condition monitoring and diagnostics. **IEEE Instrumentation Measurement Magazine**, v. 24, n. 2, p. 101–108, 2021.

\_\_\_\_\_. Application of machine learning in outdoor insulators condition monitoring and diagnostics. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 24, n. 2, p. 101–108, 2021.

EL-HAG, A. et al. An intelligent system for acoustic inspection of outdoor insulators. In: **2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 122–125.

ENRIKO, I. K. et al. Lorawan for smart street lighting solution in pangandaran regency. **JOIV : International Journal on Informatics Visualization**, v. 7, 12 2023.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Hardware Design Guidelines**. [S.l.], 2021.

\_\_\_\_\_. **ESP32 Series Datasheet**. [S.l.], 2022.

FARZANEH MASOUD E CHISHOLM, W. A. **Insulators for Icing and Polluted Environments**. [S.l.]: IEEE Press, 2009.

FREERTOS. **FreeRTOS Binary Semaphores**. 2022. <<https://freertos.org/Embedded-RTOS-Binary-Semaphores.html>>.

\_\_\_\_\_. **FreeRTOS Tasks**. 2022. <<https://freertos.org/RTOS-task-states.html>>.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.

GANGULY, A. K. **Embedded systems: Design, programming and applications**. [S.l.]: Narosa Publishing, 2014.

GENÇOĞLU, M.; CEBECI, M. Investigation of pollution flashover on high voltage insulators using artificial neural network. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 4, p. 7338–7345, 2009. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417408008269>>.

GENÇOĞLU, M. T.; CEBECI, M. The pollution flashover on high voltage insulators. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 11, p. 1914–1921, 2008. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608001132>>.

GILFILLAN, I. **MariaDB Server Documentation**. [S.l.], 2024. Disponível em: <<https://mariadb.org/wp-content/uploads/2024/05/MariaDBServerKnowledgeBase.pdf>>.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Fourth edition. [S.l.]: Pearson, 2018. ISBN 1-292-22304-9.

GONZALEZ, R. E. W. R. C. **Processamento Digital De Imagens**. [S.l.]: Addison Wesley Bra, 2009.

GOUDA, O.; KHALIFA, D. Online monitoring of medium voltage overhead distribution lines polluted insulators severity. **IET Journals**, v. 2017, 10 2017.



GOUDA, O. E.; DEIN, A. Z. E. Laboratory simulation of naturally polluted high-voltage transmission line insulators. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 8, n. 2, p. 321–327, 2014. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-gtd.2013.0405>>.

HAMBARDE, P.; VARMA, R.; JHA, S. The survey of real time operating system: Rtos. In: **2014 International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 34–39.

HUSSAIN, M. M. et al. Mechanism of saline deposition and surface flashover on outdoor insulators near coastal areas part ii: Impact of various environment stresses. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 2, p. 1068–1076, 2017.

INTERNATIONAL, E. I. **LoRa And LoRaWAN Timing**. 2022. <<https://ecsxtal.com/store/pdf/ecs-inc-international-LoRa-and-LoRaWAN-timing.pdf>>.

ISHII, M.; AKBAR, M.; KAWAMURA, T. Effect of ambient temperature on the performance of contaminated dc insulators. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, EI-19, n. 2, p. 129–134, 1984.

JIANG, M. et al. Dust contamination on surface of transmission line insulators in air-polluted regions in china: statistical characteristics, adhesion mechanism, and environmental impact factors. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 1–12, 07 2020.

JINLEI, H. et al. Insulator contamination prediction model based on bp neural network optimized by genetic algorithm. In: **2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 3166–3172.

JÚNIOR, E. da S. et al. Corona effect detection in energized polymeric insulators using machine learning and ultrasonic emissions. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 6, p. 1587–1594, 2018.

KARUNARATHNA, I. et al. Condition monitoring system for outdoor insulators. In: **2018 2nd International Conference On Electrical Engineering (EECon)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 93–98.

KHAFRAF, N. A.; EL-HAG, A. Bayesian regularization of neural network to predict leakage current in a salt fog environment. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 25, n. 2, p. 686–693, 2018.

KHATOON, S.; KHAN, A.; SINGH, S. A review of the flashover performance of high voltage insulators constructed with modern insulating materials. **Transactions on Electrical and Electronic Materials**, v. 18, p. 246–249, 10 2017.

KIM, D.-H.; LEE, E.-K.; KIM, J. Experiencing lora network establishment on a smart energy campus testbed. **Sustainability**, v. 11, n. 7, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/1917>>.

LEROUX, P. N. Rtos versus gpos: What is best for embedded development? **Embedded Computing Design**, 2005. ISSN 2405-9595.

LI, Z. et al. Pollution flashover performance of rtv coatings with partial damage. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 121, p. 106102, 2020. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519342498>>.

MATHUR, S.; PANDA, J. **Microprocessors and microcontrollers**. [S.l.]: PHI Learning Private Limited, 2016.

MEHMOOD, B.; AKBAR, M.; ULLAH, R. Accelerated aging effect on high temperature vulcanized silicone rubber composites under dc voltage with controlled environmental conditions. **Engineering Failure Analysis**, v. 118, p. 104870, 2020. ISSN 1350-6307. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630720306841>>.

MISHRA, P. Condition monitoring of high voltage composite insulators: Recent trends and findings. In: **2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 15–19.

MISTRY, J.; NAYLOR, M.; WOODCOCK, J. Adapting freertos for multicores: An experience report. **Software: Practice and Experience**, v. 44, 09 2014.

NOERGAARD, T. **Embedded Systems Architecture: A comprehensive guide for engineers and programmers**. [S.l.]: Elsevier, 2014.

OLIVEIRA, W. S.-T. José Raimundo de. **Transdutores**. [S.l.]: FEEC - Unicamp, 2019.

PAKALA, H. G. M.; RAJU, K. Sensors integration in embedded systems. In: . [S.l.: s.n.], 2010.

POLISETTY, S.; EL-HAG, A.; JAYRAM, S. Classification of common discharges in outdoor insulation using acoustic signals and artificial neural network. **High Voltage**, v. 4, n. 4, p. 333–338, 2019. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/hve.2019.0113>>.

PRAJZLER, V. **What is LoRa: The Fundamentals**. 2024. <<https://medium.com/@prajzler/what-is-lora-the-fundamentals-79a5bb3e6dec>>.

RAMANI, R. et al. Iot based condition monitoring of outdoor insulators under heavily polluted conditions. In: **2019 IEEE 4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

SALEM, A. A. et al. Factors and models of pollution flashover on high voltage outdoor insulators: Review. In: **2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 241–246.

SANTOS, H. de; BOBI, M. A cumulative pollution index for the estimation of the leakage current on insulator strings. **IEEE Transactions on Power Delivery**, PP, p. 1–1, 01 2020.

SANYAL, S. et al. Replacement strategy of insulators established by probability of failure. **Energies**, v. 13, n. 8, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/2043>>.

SHIN-TING, W. **Circuitos Complementares**. [S.l.]: FEEC - Unicamp, 2019.

---

SILVA, I. N. et al. Condition monitoring of power insulators using intelligent techniques – a survey. In: **Proceedings of the IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)**. [S.l.: s.n.], 2022.

SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S.-H. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. **ICT Express**, v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017. ISSN 2405-9595. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>>.

SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC**. [S.l.]: Editora Érica, 2009.

STASZEWSKI, W.; JABŁOŃSKI, A.; DZIEDZIECH, K. A survey of communication protocols in modern embedded condition monitoring systems. **Diagnostyka**, v. 19, n. 2, p. 53–62, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.29354/diag/86409>>.

TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. **ADS1113/ ADS1114/ ADS1115: Ultra-Small,Low-Power,16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference**. [S.l.], 2009.

THANH, P. N.; CHO, M.-Y.; DA, T. N. Insulator leakage current prediction using surface spark discharge data and particle swarm optimization based neural network. **Electric Power Systems Research**, v. 191, p. 106888, 2021. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620306866>>.

ULLAH, I.; AKBAR, M. Anti-aging characteristics of rtv-sir aided hv insulator coatings: Impact of dc polarity and fillers. **Materials Chemistry and Physics**, v. 278, p. 125634, 2022. ISSN 0254-0584. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058421014176>>.

ZHAO, S. et al. Collision mechanism and deposition characteristics of particles on the catenary insulator surface. **Coatings**, v. 10, n. 7, 2020. ISSN 2079-6412. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-6412/10/7/697>>.

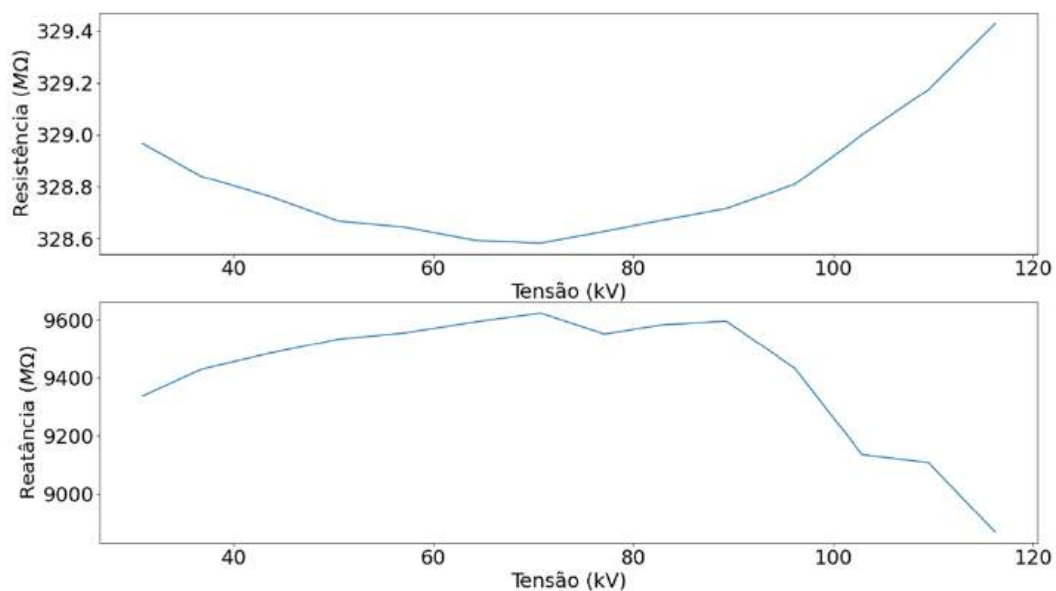


## **Apêndices**

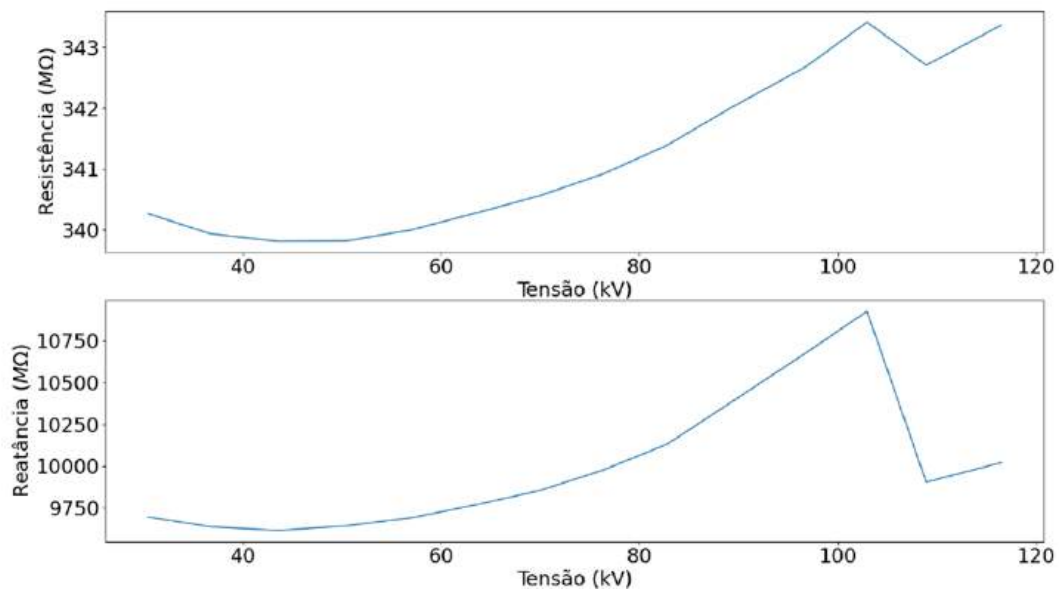


## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS ISOLADORES SUJOS E SECOS

ISODD01



ISODD02

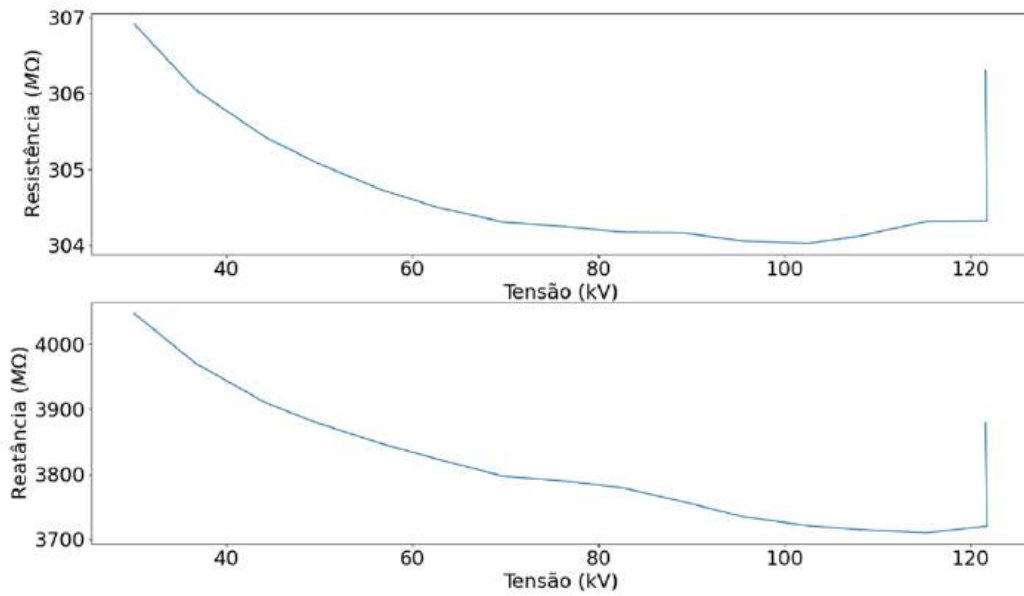




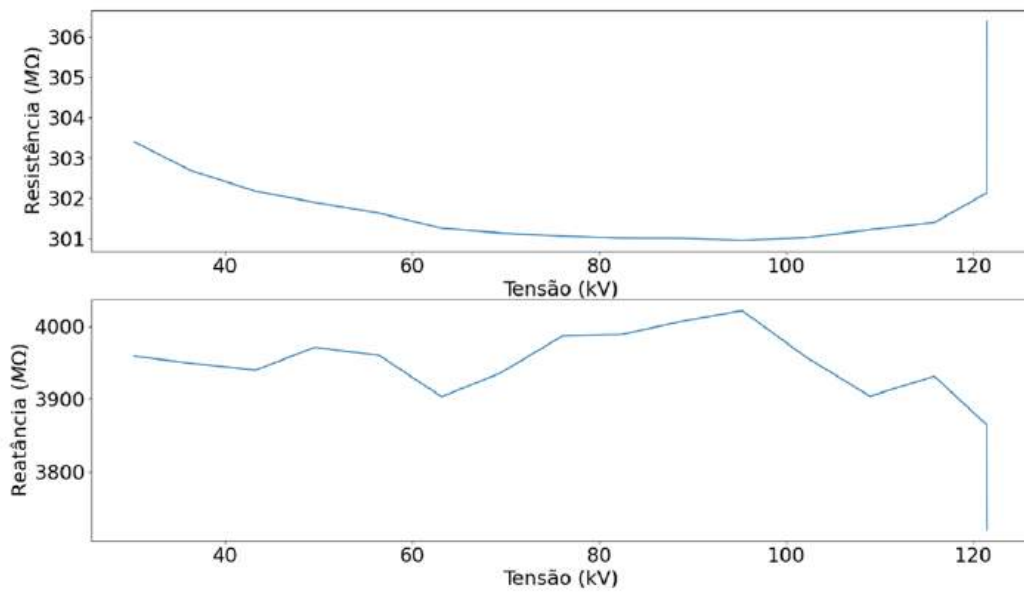


## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS ISOLADORES SUJOS E ÚMIDOS

ISODW01

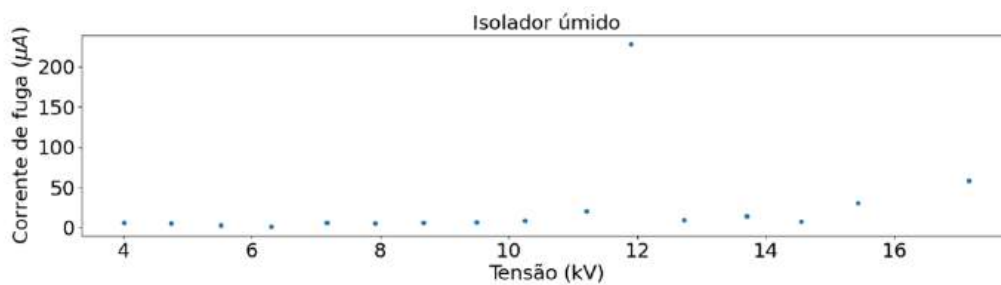
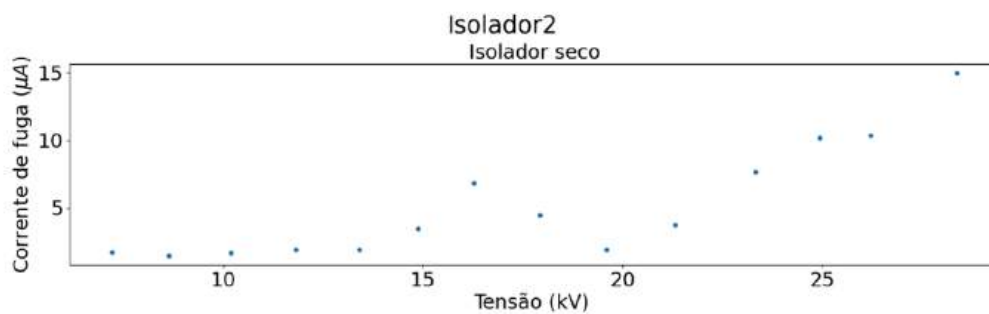
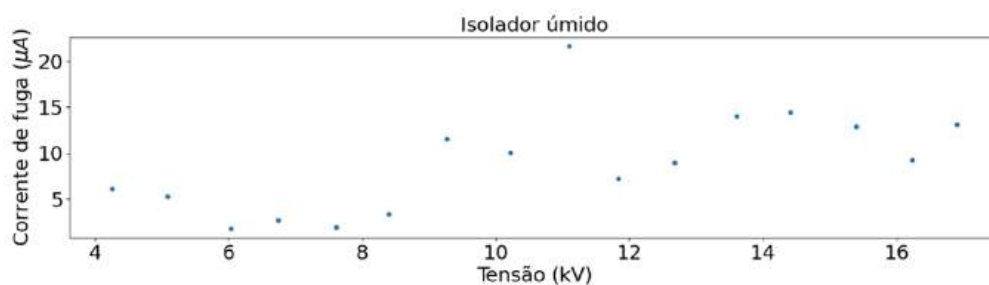
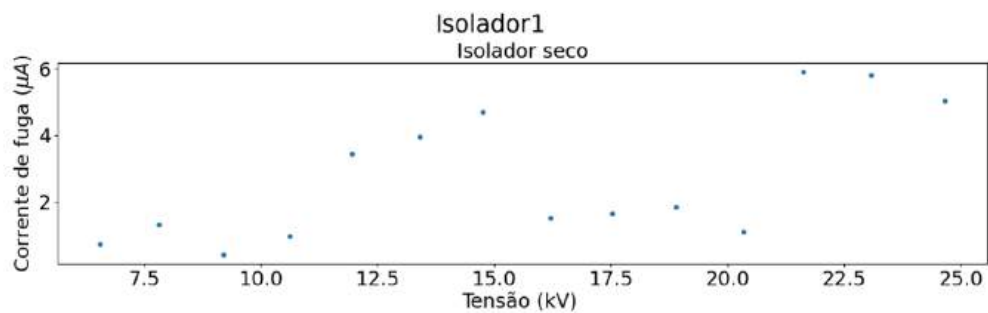


ISODW02



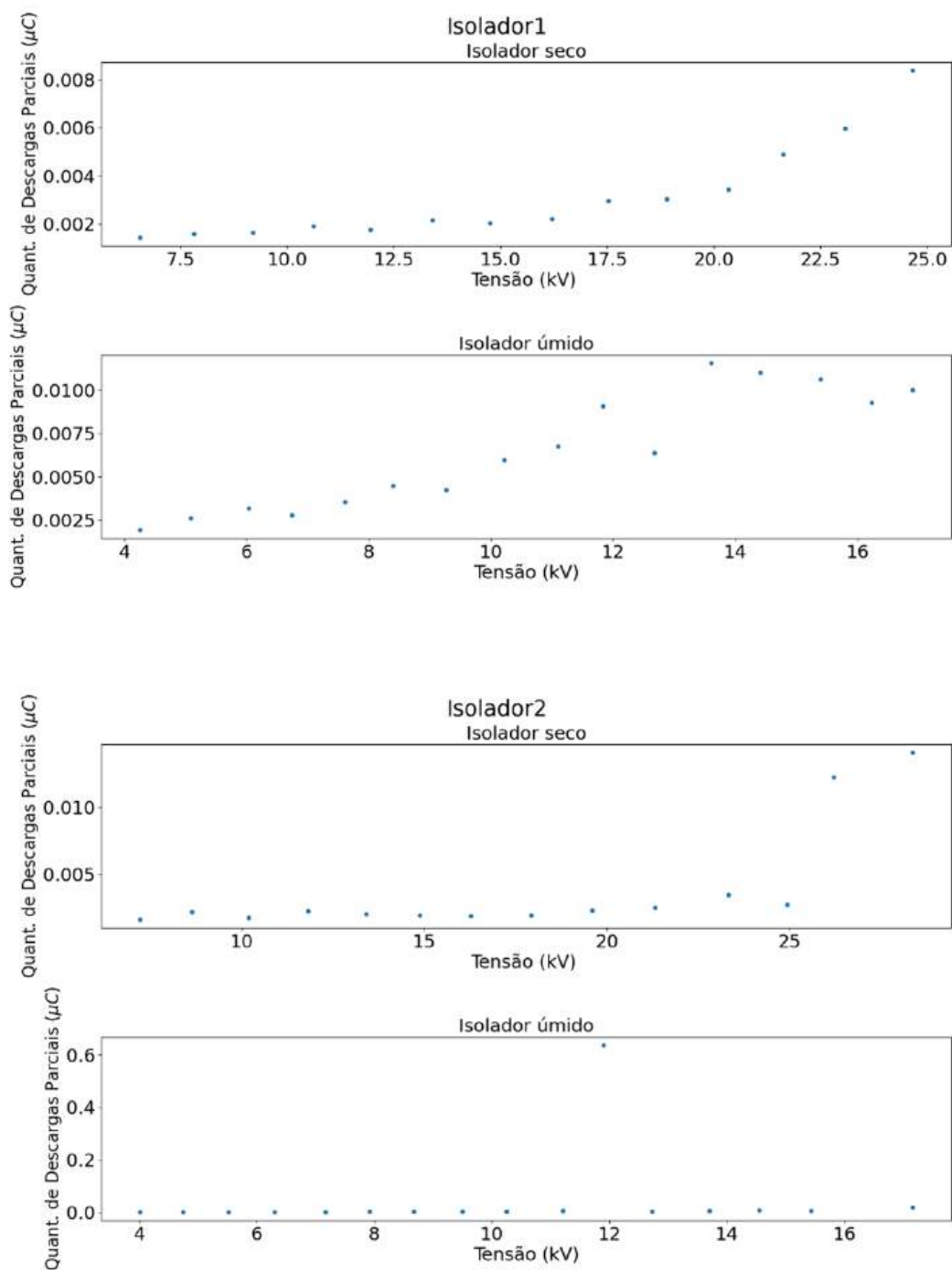


## APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS PARA AS CORRENTES DE FUGA DOS ISOLADORES CONTAMINADOS



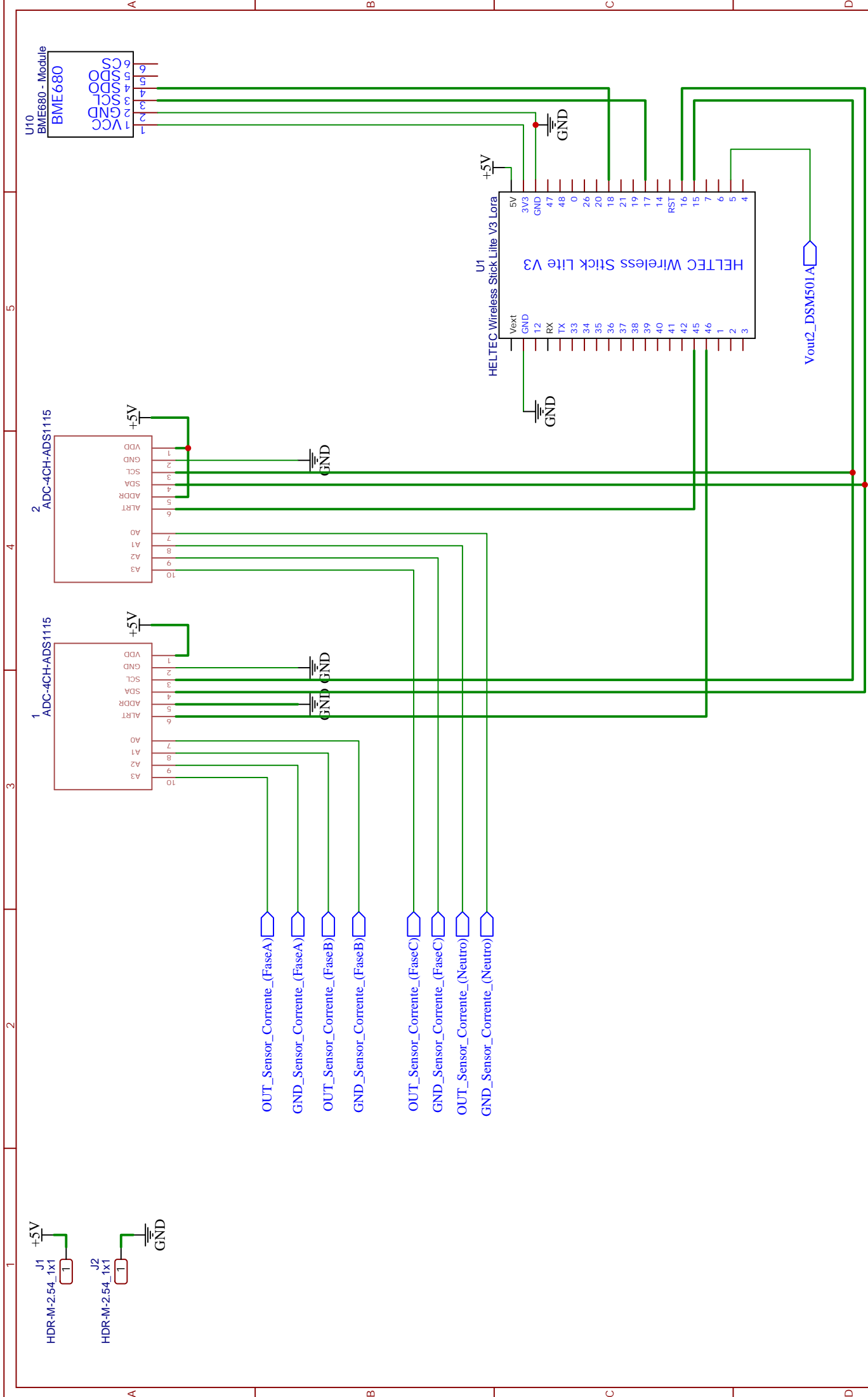



## APÊNDICE D – RESULTADOS DA QUANTIDADE DE DESCARGAS PARCIAIS OBTIDAS PARA OS ISOLADORES CONTAMINADOS





**APÊNDICE E – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DO MONITOR DE CONDIÇÃO  
DE ISOLAÇÃO**



<b>TITLE:</b> Esquemático Elétrico do Monitor de Condição de Isolacao		<b>REV:</b> 1.0
		<b>Company:</b> USP
<b>Date:</b> 2023-02-20		<b>Sheet:</b> 1/1
<b>Drawn By:</b> Sofia L. / Rogério F.		