

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**THALLIA FERNANDA DIAS FAGUNDES**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS ASSOCIADOS AO ENVELHECIMENTO DE**  
**PARA-RAIOS SUBMETIDOS A DESCARGAS**  
**DE CORRENTE**

Itajubá-MG

Junho de 2026

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**THALLIA FERNANDA DIAS FAGUNDES**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS ASSOCIADOS AO ENVELHECIMENTO DE  
PARA-RAIOS SUBMETIDOS A DESCARGAS  
DE CORRENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares  
Wanderley Neto

Coorientador: Prof. Dr. Credson de Salles

Itajubá-MG

Junho de 2026

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado forças e me guiado até aqui.*

*Sou grata pelo apoio e pela paciência da minha família durante todo esse percurso do mestrado.*

*Agradeço, de modo especial, aos professores Estácio Tavares Wanderley Neto e Credson de Salles pelo conhecimento compartilhado, pela amizade e pela oportunidade de tê-los como orientadores.*

*Agradeço ao Cleython Silvestre de Aguiar pela amizade e pelo suporte durante os ensaios elétricos desta dissertação.*

*Além disso, sou grata aos estagiários Augusto, Wellington, Gabriel, Ighor e Marcelo pelo apoio durante os ensaios.*

*Agradeço também a Tessa Martins pela ajuda durante todos os ensaios físico-químicos deste trabalho.*

*Sou grata ao professor Edson Guedes da Costa e ao engenheiro eletricista Thiago Arantes pelos conhecimentos compartilhados no início da pesquisa, essenciais para consolidar o rumo deste trabalho.*

*Sou grata à Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI pelo suporte e pela oportunidade de cursar a Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.*

*Agradeço, de forma especial, aos laboratórios de Metalurgia e Materiais (LMM) e de Caracterização Estrutural (LCE) da UNIFEI pela disponibilidade e atenção durante os ensaios de caracterização estrutural das amostras.*

*Agradeço ao Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez – LAT-EFEI e aos seus colaboradores por toda a assistência prestada desde o último ano da minha graduação.*

*Sou grata à CAPES pelo apoio financeiro.*

*Por fim, agradeço a todos os colegas e amigos que contribuíram de alguma forma para este trabalho.*

**DEDICATÓRIA**

*A Deus, pela minha vida, pela vida das pessoas que eu amo e por me permitir desenvolver esta pesquisa.*

*A minha família, em especial a minha mãe, Leila, a minha irmã, Maria Rita, e a minha avó, Sebastiana, por sempre me apoiarem e rezarem por mim.*

*Ao meu noivo, João Luiz, pelo suporte emocional, essencial para a conclusão deste trabalho.*

*Aos meus amigos, pelo companheirismo e pelo apoio.*

## RESUMO

Os para-raios são dispositivos de proteção instalados ao longo do sistema elétrico para limitar as sobretensões decorrentes de impulsos atmosféricos, manobras e falhas da rede. Todavia, esses dispositivos estão sujeitos a processos de degradação que podem comprometer seu desempenho, causar falhas e afetar a confiabilidade da rede. Nesse contexto, torna-se necessário avaliar os mecanismos associados ao envelhecimento dos para-raios e identificar os parâmetros mais sensíveis para o monitoramento de sua condição operacional. Assim, para a metodologia deste trabalho, realizou-se o envelhecimento por impulso de corrente aplicado a três lotes de para-raios de fabricantes distintos, compostos por três amostras de 15 kV cada. Durante o processo de envelhecimento, os dispositivos foram avaliados por meio da medição da corrente de fuga e das descargas parciais. Ao final do processo, foram realizadas análises microestruturais em amostras novas e envelhecidas, a fim de investigar os efeitos da degradação. Os resultados indicaram que os parâmetros derivados da corrente de fuga apresentaram maior sensibilidade no monitoramento do envelhecimento dos para-raios, destacando-se a potência dissipada e os harmônicos de terceira ordem. Já os sinais de descargas parciais foram detectados apenas em partes das amostras e nas etapas finais do processo degradativo. Além disso, observou-se que as amostras que apresentaram descargas parciais também apresentaram alterações nas medições finais da corrente de fuga. As análises microestruturais confirmaram os indícios de degradação observados nos ensaios elétricos. Dessa forma, concluiu-se que a utilização conjunta das técnicas empregadas mostrou-se eficiente para a análise do envelhecimento de para-raios de distribuição, sendo os parâmetros derivados da corrente de fuga os indicadores mais promissores para o monitoramento da degradação desses dispositivos.

*Palavras-chave: para-raios; envelhecimento; corrente de fuga; descargas parciais; análises microestruturais.*

## ABSTRACT

Surge arresters are protective devices installed throughout power systems to limit overvoltages caused by lightning impulses, switching operations, and network faults. However, these devices are subject to degradation processes that may compromise their performance, lead to failure, and affect system reliability. In this context, it is essential to investigate the mechanisms associated with surge arrester aging and to identify the most sensitive parameters for monitoring their operational condition. For this purpose, an aging procedure based on current impulse stresses was applied to three groups of surge arresters from different manufacturers, each group consisting of three 15 kV samples. Throughout the aging process, the devices were evaluated through leakage current and partial discharge measurements. At the end of the aging procedure, microstructural analyses were performed on both new and aged samples to investigate the effects of degradation. The results indicated that leakage current-derived parameters exhibited the highest sensitivity for monitoring surge arrester aging, with dissipated power and third-order harmonics standing out as the most representative indicators. Partial discharge activity was detected only in a subset of the samples and during the final stages of the degradation process. Furthermore, samples exhibiting partial discharge activity also showed changes in the final leakage current measurements. Microstructural analyses confirmed the degradation evidence observed in the electrical tests. Therefore, it was concluded that the combined application of the employed techniques was effective for assessing the aging of distribution surge arresters, with leakage current-derived parameters emerging as the most promising indicators for monitoring the degradation of these devices.

*Keywords: surge arresters; aging; leakage current; partial discharge; microstructural analysis.*

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Condições de tensão e de corrente para resistores não lineares de SiC e de ZnO [1].<br>.....                                                                     | 27 |
| Figura 2. Evolução dos para-raios [1]. .....                                                                                                                               | 27 |
| Figura 3. Característica de atuação do para-raios a SiC. Adaptado de [1]. .....                                                                                            | 28 |
| Figura 4. Características de atuação dos para-raios de SiC do tipo "gap". Adaptado de [1]. ..                                                                              | 29 |
| Figura 5. Diferentes tipos de varistores de óxido metálico. Adaptado de [14]. .....                                                                                        | 30 |
| Figura 6. Desenho construtivo de um para-raio de ZnO. Adaptado de [16]. .....                                                                                              | 31 |
| Figura 7. Desenho esquemático da microestrutura do varistor a ZnO em <b>a</b> [10]. Imagem no microscópio do varistor a ZnO em <b>b</b> (grão de ZnO em preto) [18]. ..... | 32 |
| Figura 8. Circuito equivalente do disco a ZnO. Adaptado de [20]. .....                                                                                                     | 32 |
| Figura 9. Relação da temperatura com a tensão e a corrente do varistor a ZnO. Adaptado de [10]. .....                                                                      | 35 |
| Figura 10. Representação da ocorrência de instabilidade térmica dos para-raios. Adaptado de [26]. .....                                                                    | 36 |
| Figura 11. Componentes resistivas de corrente de fuga. Adaptado de [30]. .....                                                                                             | 37 |
| Figura 12. Tipos de sobretensão. Adaptado de [33]. .....                                                                                                                   | 38 |
| Figura 13. Sinais de DP no ar. Adaptado de [37]. .....                                                                                                                     | 39 |
| Figura 14. Classificação das DP. .....                                                                                                                                     | 40 |
| Figura 15. DP entre varistores e a superfície do invólucro [5]. .....                                                                                                      | 41 |
| Figura 16. Descarga parcial superficial em para-raios de ZnO submetidos à poluição salina [2].<br>.....                                                                    | 42 |
| Figura 17. Modelo da barreira dupla de Schottky. Adaptado de [19, 45]. .....                                                                                               | 43 |
| Figura 18. Modelo da barreira dupla de Schottky em desequilíbrio. Adaptado de [19, 45]. ...                                                                                | 44 |
| Figura 19. Representação das características de tensão-corrente de um para-raios de ZnO. Adaptado de [18, 20]. .....                                                       | 45 |
| Figura 20. Potência em função do número de impulsos aplicados à temperatura ambiente, a 60 °C e a 80 °C [32]. .....                                                        | 47 |
| Figura 21. Decomposição de um sinal de corrente de fuga em suas componentes capacitivas e resistivas, conforme metodologia de Zhao [51], [31]. .....                       | 49 |
| Figura 22. Fluxograma representativo da metodologia realizada. ....                                                                                                        | 53 |
| Figura 23. Circuito de acoplamento em série para mensuração de DP. Adaptado de [7]. .....                                                                                  | 55 |
| Figura 24. PRPD em um para-raio de 192 kV, indicando sinais de DP. Adaptado de [57]. ....                                                                                  | 56 |

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25. Cella de ensaio de DP.....                                                                                                                                                        | 57 |
| Figura 26. Calibrador (A), painel de controle (B) e detector de descargas parciais (C). ....                                                                                                 | 57 |
| Figura 27. Ensaio de descargas parciais em para-raios. ....                                                                                                                                  | 58 |
| Figura 28. Detector de ultrassom: modelo 250. ....                                                                                                                                           | 59 |
| Figura 29. Manuseio do detector de ultrassom.....                                                                                                                                            | 59 |
| Figura 30. Medição da corrente de fuga total em laboratório ao longo do tempo. Adaptado de [64]. ....                                                                                        | 60 |
| Figura 31. Circuito para ensaio de medição da corrente de fuga. Adaptado de [31]. ....                                                                                                       | 62 |
| Figura 32. Cella de ensaio de corrente de fuga. Objeto sob teste (A), resistor <i>shunt</i> (B), transformador de potencial (C) e ponta de alta tensão (D).....                              | 62 |
| Figura 33. Cella de ensaio de corrente de fuga. Osciloscópio Tektronix (A), amplificador (B) e gerador de funções (C). ....                                                                  | 63 |
| Figura 34. Fluxograma do algoritmo para análise da corrente de fuga. ....                                                                                                                    | 67 |
| Figura 35. Forma de onda padrão de tensão de um impulso atmosférico. Adaptado de [68]. .                                                                                                     | 68 |
| Figura 36. Forma de onda de corrente padrão decorrente de um impulso atmosférico. Adaptado de [70].....                                                                                      | 69 |
| Figura 37. Circuito para ensaio de impulso de corrente. Adaptado de [31].....                                                                                                                | 70 |
| Figura 38. Cella de ensaio de impulso de corrente. Resistor limitador de corrente (A), fonte de tensão AC (B), diodo retificador (C), divisor capacitivo (D) e banco de capacitores (E)..... | 71 |
| Figura 39. Cella de ensaio de impulso de corrente. <i>Gap</i> (A), indutor limitador (B), objeto sob ensaio (C) e TC de alta frequência (D).....                                             | 72 |
| Figura 40. Varistores de ZnO de amostras de para-raios. ....                                                                                                                                 | 73 |
| Figura 41. Fragmentos do varistor para ensaios de TGA e DSC. ....                                                                                                                            | 73 |
| Figura 42. Lascas do varistor para análises físico-químicas. ....                                                                                                                            | 74 |
| Figura 43. Equipamento para o preparo das amostras. Ebutidora (A), lixadeira (B) e politriz (C). ....                                                                                        | 74 |
| Figura 44. Amostras preparadas para ensaios microestruturais. ....                                                                                                                           | 75 |
| Figura 45. DSC em nanopartículas de ZnO [78]. ....                                                                                                                                           | 76 |
| Figura 46. Calorímetro para análise de DSC das amostras. ....                                                                                                                                | 76 |
| Figura 47. TGA em ZnO puro. Adaptado de [82]. ....                                                                                                                                           | 77 |
| Figura 48. Analisador termogravimétrico para análise de TGA das amostras.....                                                                                                                | 78 |
| Figura 49. Microscopias óticas em varistores a ZnO. Amostra nova em (a); e amostra envelhecida com impulsos atmosféricos a 80 °C em (b). Adaptado de [11].....                               | 78 |
| Figura 50. Microscópio ótico para análise microscópica das amostras.....                                                                                                                     | 79 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 51. MEV em varistores de ZnO: sem envelhecimento (a), defeituoso (b) e após uma explosão (c). Adaptado de [84].        | 80 |
| Figura 52. EDS em varistores a ZnO. Amostra antes da degradação em (a); e amostra após a degradação em (b). Adaptado de [87]. | 80 |
| Figura 53. Microscópio eletrônico de varredura com espectrômetro acoplado para análise por MEV e EDS.                         | 81 |
| Figura 54. DRX em varistor a ZnO antes do envelhecimento (C) e após os impulsos de 20 °C (A), 60 °C (B) e 80 °C (D) [11].     | 82 |
| Figura 55. Difrator para análise das estruturas cristalinas das amostras.                                                     | 82 |
| Figura 56. Resultado do impulso de corrente, com duração de 4/10 $\mu$ s, em uma amostra nova.                                | 83 |
| Figura 57. Último resultado do impulso de corrente, com duração de 4/10 $\mu$ s, da amostra Am-03 do Lote 2.                  | 84 |
| Figura 58. Resultado do impulso de corrente adicional com duração de 4/10 $\mu$ s da amostra Am-03 do Lote 1.                 | 85 |
| Figura 59. Resultado da última medição de DP (A) e do respectivo PRPD (B) da amostra Am-02 do Lote 1.                         | 86 |
| Figura 60. Resultado da última medição de DP (A) e do respectivo PRPD (B) da amostra Am-03 do Lote 1.                         | 87 |
| Figura 61. Resultado da última medição de DP (A) e do respectivo PRPD (B) da amostra Am-01 do Lote 3.                         | 88 |
| Figura 62. Exemplo de medição da corrente de fuga total em uma amostra de para-raios de 15 kV.                                | 89 |
| Figura 63. Pico positivo da corrente de fuga e da tensão RMS durante o processo de envelhecimento do Lote 1.                  | 90 |
| Figura 64. Pico positivo da corrente de fuga e da tensão RMS durante o processo de envelhecimento do Lote 2.                  | 91 |
| Figura 65. Pico positivo da corrente de fuga e da tensão RMS durante o processo de envelhecimento do Lote 3.                  | 91 |
| Figura 66. Harmônicos resistivos ímpares ao longo do processo de envelhecimento do Lote 1.                                    | 92 |
| Figura 67. Harmônicos resistivos ímpares ao longo do processo de envelhecimento do Lote 2.                                    | 93 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 68. Harmônicos resistivos ímpares ao longo do processo de envelhecimento do Lote 3.<br>.....                                         | 93  |
| Figura 69. Harmônicos resistivos médios iniciais e finais de cada lote. ....                                                                | 94  |
| Figura 70. Harmônicos resistivos médios iniciais e finais do trecho progressivo de cada lote.<br>.....                                      | 95  |
| Figura 71. Gráfico de tendência do THD total a partir da componente resistiva de cada lote.                                                 | 95  |
| Figura 72. Gráfico de cada medição do THD total a partir da componente resistiva da amostra<br>Am-01 do Lote 1. ....                        | 96  |
| Figura 73. Potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento do Lote 1.....                                                         | 97  |
| Figura 74. Potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento do Lote 2.....                                                         | 98  |
| Figura 75. Potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento do Lote 3.....                                                         | 98  |
| Figura 76. Polaridade da corrente de fuga total. Comparação por lotes.....                                                                  | 99  |
| Figura 77. Parâmetros monitorados ao longo de todo o processo de envelhecimento.<br>Comparação por lotes. ....                              | 100 |
| Figura 78. Parâmetros monitorados durante o processo de envelhecimento no trecho<br>progressivo. Comparação por lotes. ....                 | 101 |
| Figura 79. MOR da amostra nova do Lote 1. Ampliação de 100x (A), 200x (B) e 500x (C).<br>.....                                              | 103 |
| Figura 80. MOR da amostra Am-03 envelhecida do Lote 1. Ampliação de 100x (A), 200x (B)<br>e 500x (C). ....                                  | 103 |
| Figura 81. Medição da porosidade na amostra nova (A) e na amostra Am-03 envelhecida (B)<br>do Lote 1.....                                   | 103 |
| Figura 82. MOR da amostra nova do Lote 2. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).....                                                      | 104 |
| Figura 83. MOR da amostra Am-02 envelhecida do Lote 2. Ampliação 100x (A), 200x (B) e<br>500x (C). ....                                     | 104 |
| Figura 84. Medição da porosidade na amostra nova (A) e na amostra Am-02 envelhecida (B)<br>do Lote 2.....                                   | 104 |
| Figura 85. MOR da amostra nova do Lote 3. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).....                                                      | 104 |
| Figura 86. MOR da amostra Am-02 envelhecida do Lote 3. Ampliação 100x (A), 200x (B) e<br>500x (C). ....                                     | 105 |
| Figura 87. MOR da amostra Am-03 envelhecida do Lote 3. Ampliação 100x (A), 200x (B) e<br>500x (C). ....                                     | 105 |
| Figura 88. Medição da porosidade na amostra nova (A), na amostra Am-02 envelhecida (B) e<br>na amostra Am-03 envelhecida (C) do Lote 3..... | 105 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 89. MEV na amostra nova do Lote 1. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                                | 106 |
| Figura 90. MEV na amostra Am-03 envelhecida do Lote 1. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                   | 106 |
| Figura 91. MEV na amostra nova do Lote 2. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                                | 106 |
| Figura 92. MEV na amostra Am-02 envelhecida do Lote 2. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                   | 107 |
| Figura 93. MEV na amostra nova do Lote 3. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                                | 107 |
| Figura 94. MEV na amostra Am-02 envelhecida do Lote 3. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                   | 107 |
| Figura 95. MEV na amostra Am-03 envelhecida do Lote 3. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).                                                                   | 107 |
| Figura 96. Mapa elementar da amostra nova (A) e amostra Am-03 envelhecida (B) do Lote 1.                                                                 | 108 |
| Figura 97. Mapa elementar da amostra nova (A) e amostra Am-02 envelhecida (B) do Lote 2.                                                                 | 109 |
| Figura 98. Mapa elementar da amostra nova (A), amostra Am-02 envelhecida (B) e amostra Am-03 envelhecida (C) do Lote 3.                                  | 109 |
| Figura 99. Resultado do ensaio de DRX da amostra nova (azul) e da amostra Am-03 envelhecida (vermelho) do Lote 1.                                        | 110 |
| Figura 100. Resultado do ensaio de DRX da amostra nova (azul) e da amostra Am-02 envelhecida (vermelho) do Lote 2.                                       | 111 |
| Figura 101. Resultado do ensaio de DRX da amostra nova (azul), da amostra Am-02 envelhecida (vermelho) e da amostra Am-03 envelhecida (verde) do Lote 3. | 112 |
| Figura 102. Resultado do ensaio de DSC da amostra nova (A) e da amostra Am-03 envelhecida (B) do Lote 1.                                                 | 112 |
| Figura 103. Resultado do ensaio de DSC da amostra nova (A) e da amostra Am-02 envelhecida (B) do Lote 2.                                                 | 113 |
| Figura 104. Resultados do ensaio de DSC das amostras nova (A), Am-02 envelhecida (B) e Am-03 envelhecida (C) do Lote 3.                                  | 113 |
| Figura 105. Resultados do ensaio de TGA das amostras nova (A) e envelhecida (Am-03) do Lote 1 (B).                                                       | 114 |
| Figura 106. Resultados do ensaio de TGA das amostras nova (A) e envelhecida (Am-02) do Lote 2 (B).                                                       | 115 |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 107. Resultados do ensaio de TGA das amostras nova (A), Am-02 envelhecida (B) e Am-03 envelhecida (C) do Lote 3. .... | 115 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

**LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1. Características técnicas das amostras de para-raios.....                                  | 51  |
| Tabela 2. Faixa de frequência para instrumentos de medição conforme a ABNT NBR IEC 60270 [7]. ..... | 54  |
| Tabela 3. Número de impulsos de corrente de 20 kA suportados por cada peça. ....                    | 84  |
| Tabela 4. Sinais máximos de carga antes e após o envelhecimento de cada amostra. ....               | 86  |
| Tabela 5. Comparação do THD resistivo completo e do trecho progressivo para cada lote....           | 96  |
| Tabela 6. Correlação de Pearson aplicada aos parâmetros de monitoramento.....                       | 101 |
| Tabela 7. Porcentagem da porosidade das amostras novas e envelhecidas de cada lote.....             | 105 |
| Tabela 8. Comparação de dados do EDS entre a amostra nova e envelhecida do Lote 1.....              | 108 |
| Tabela 9. Comparação de dados do EDS entre a amostra nova e envelhecida do Lote 2. ....             | 109 |
| Tabela 10. Comparação de dados do EDS entre a amostra nova e envelhecida do Lote 3....              | 109 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                |                                                                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT                           | Associação Brasileira de Normas Técnicas.                                                |
| Al                             | Alumínio.                                                                                |
| AT                             | Alta tensão.                                                                             |
| Bi                             | Bismuto.                                                                                 |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Óxido de bismuto.                                                                        |
| Co                             | Cobalto.                                                                                 |
| CO                             | Monóxido de carbono.                                                                     |
| CO <sub>2</sub>                | Dióxido de carbono.                                                                      |
| CSV                            | <i>Comma-Separated Values</i> – Arquivo de valores separados por vírgula.                |
| DBS                            | Duplas barreiras de Schottky                                                             |
| DC                             | <i>Direct current</i> - Corrente contínua.                                               |
| DP                             | Descargas parciais.                                                                      |
| DRX                            | Difração de raios X.                                                                     |
| DSC                            | Calorimetria exploratória diferencial.                                                   |
| EDS                            | Espectroscopia de raios X por dispersão de energia.                                      |
| FFT                            | <i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier.                          |
| FRP                            | <i>Fiberglass Reinforced Plastic</i> – Plástico com reforço de fibra de vidro.           |
| HNO <sub>3</sub>               | Ácido nítrico.                                                                           |
| IEC                            | <i>International Electrotechnical Commission</i> – Comissão Eletrotécnica Internacional. |
| kA                             | Quiloampère                                                                              |
| kV                             | Quilovolt                                                                                |
| LAT-EFEI                       | Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Barreira Martinez.                          |
| LCE                            | Laboratório de Caracterização Estrutural.                                                |
| LMM                            | Laboratório de Metalurgia e Materiais.                                                   |
| mA                             | Miliampère.                                                                              |
| MCOV                           | <i>Maximum Continuous Operating Voltage</i> - Máxima tensão operacional contínua.        |
| MEV                            | Microscopia eletrônica de varredura.                                                     |
| Mn                             | Manganês.                                                                                |
| MOR                            | Microscopia ótica de reflexão.                                                           |
| MOV                            | <i>Metal Oxide Varistor</i> - Varistores a óxido metálico.                               |
| NaCl                           | Cloreto de sódio.                                                                        |

|                 |                                                                                              |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| NBR             | Norma Técnica Brasileira.                                                                    |
| NBI             | Nível básico de isolamento.                                                                  |
| NH <sub>3</sub> | Amônia.                                                                                      |
| NO <sub>2</sub> | Dióxido de nitrogênio.                                                                       |
| OCTAVE          | Software utilizado para processamento de sinais de descargas parciais e corrente de fuga.    |
| PRPD            | <i>Phase-Resolved Partial Discharge</i> – Padrão de Descargas Parciais em Resolução de Fase. |
| p.u.            | Por unidade.                                                                                 |
| RMS             | <i>Root Mean Square</i> – valor eficaz.                                                      |
| Sb              | Antimônio.                                                                                   |
| SEP             | Sistema Elétrico de Potência.                                                                |
| SiC             | Carboneto de silício.                                                                        |
| TC              | Transformador de corrente.                                                                   |
| TGA             | Análise termogravimétrica.                                                                   |
| THD             | <i>Total Harmonic Distortion</i> – distorção harmônica total.                                |
| TOV             | <i>Transient overvoltage</i> – sobretensão transitória.                                      |
| UNIFEI          | Universidade Federal de Itajubá.                                                             |
| VOM             | Varistor a óxido metálico.                                                                   |
| Zn              | Zinco.                                                                                       |
| ZnO             | Óxido de zinco.                                                                              |
| μA              | Microampère                                                                                  |
| μs              | Microsegundo                                                                                 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |                                                                                    |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$      | Coeficiente de não-linearidade                                                     |
| $\Delta f$    | Largura de banda                                                                   |
| $\varepsilon$ | Constante dielétrica                                                               |
| $\rho$        | Resistividade                                                                      |
| $\tau$        | Temperatura absoluta                                                               |
| $\phi_B$      | Barreira de potencial                                                              |
| $a_h$         | Coeficiente harmônico associado ao componente cossenoidal de ordem h               |
| A             | Constante específica do material                                                   |
| $A_1$         | Amostra 1                                                                          |
| $A_2$         | Amostra 2                                                                          |
| $A_3$         | Amostra 3                                                                          |
| Am-01         | Amostra 01 destinada ao processo de envelhecimento                                 |
| Am-02         | Amostra 02 destinada ao processo de envelhecimento                                 |
| Am-03         | Amostra 03 destinada ao processo de envelhecimento                                 |
| $b_h$         | Coeficiente harmônico associado à componente senoidal de ordem h                   |
| C             | Constante dielétrica da cama granular; capacitância equivalente do ramo capacitivo |
| $C^{(0)}$     | Valor inicial da capacitância equivalente utilizado no processo iterativo          |
| $C^{(n)}$     | Valor da capacitância equivalente na n-ésima iteração                              |
| $C^{(n+1)}$   | Valor atualizado da capacitância equivalente na iteração seguinte                  |
| $C_0$         | Capacitor série                                                                    |
| $C_a$         | Capacitância do objeto em teste                                                    |
| CC            | Cabos de conexão                                                                   |
| CD            | Quadripolo                                                                         |
| $C_k$         | Capacitor de acoplamento                                                           |
| $C_S$         | Capacitância série do modelo equivalente de Zhao                                   |
| $C_T$         | Fator de dissipação térmica                                                        |
| $C_{Tm}$      | Capacidade de calor por unidade de massa                                           |
| DP-01         | Amostra 01 de referência para o ensaio de descargas parciais                       |
| DP-02         | Amostra 02 de referência para o ensaio de descargas parciais                       |
| DP-03         | Amostra 03 de referência para o ensaio de descargas parciais                       |
| E             | Tensão do campo elétrico                                                           |

|                |                                                                          |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $E_d$          | Energia dissipada                                                        |
| $f_1$          | Limite inferior de frequência                                            |
| $f_2$          | Limite superior de frequência                                            |
| $f_m$          | Frequência central                                                       |
| Fuga-01        | Amostra 01 de referência para o ensaio de corrente de fuga               |
| Fuga-02        | Amostra 02 de referência para o ensaio de corrente de fuga               |
| Fuga-03        | Amostra 03 de referência para o ensaio de corrente de fuga               |
| $h$            | Ordem harmônica                                                          |
| $H_1$          | Amplitude da componente harmônica fundamental                            |
| $H_3$          | Amplitude da terceira componente harmônica                               |
| $H_5$          | Amplitude da quinta componente harmônica                                 |
| $H_7$          | Amplitude da sétima componente harmônica                                 |
| $H_9$          | Amplitude da nona componente harmônica                                   |
| $H_h$          | Amplitude harmônica de ordem $h$                                         |
| $I$            | Corrente                                                                 |
| $I_1$          | Corrente 1                                                               |
| $I_2$          | Corrente 2                                                               |
| $I_A$          | Corrente de origem atmosférica                                           |
| $I_C$          | Componente de corrente capacitiva                                        |
| $I_n$          | Corrente subsequente em frequência nominal                               |
| $I_R$          | Componente de corrente resistiva                                         |
| $I_{RMSC}$     | Valor eficaz da componente capacitiva da corrente de fuga                |
| $I_{RMSR}$     | Valor eficaz da componente resistiva da corrente de fuga                 |
| $I_{RMStotal}$ | Valor eficaz da corrente de fuga total                                   |
| $i(t)$         | Corrente total em função do tempo                                        |
| $i_C(t)$       | Componente capacitiva da corrente em função do tempo                     |
| $i_R(t)$       | Componente resistiva da corrente em função do tempo                      |
| $i_{Rk}$       | Valor discreto da componente resistiva da corrente na $k$ -ésima amostra |
| $J_0$          | Constante dependente do tipo de camada granular do material              |
| $J_1$          | Constante específica do material                                         |
| $k$            | Constante de Boltzmann; índice discreto de amostragem                    |
| $l$            | Número de observações consideradas para fórmula de Pearson               |
| $L$            | Indutância do disco                                                      |
| $m$            | Massa do elemento da válvula                                             |

|             |                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| MI          | Instrumentos de medição                                             |
| n           | Número de observações consideradas; índice de iterações             |
| N           | Número de amostras do sinal                                         |
| P           | Geração de calor                                                    |
| $P_R(t)$    | Potência média resistiva                                            |
| $p_R(t)$    | Potência resistiva instantânea                                      |
| Q           | Capacidade de dissipação térmica dos para-raios                     |
| $q_0$       | Carga injetada pelo calibrador                                      |
| r           | Coefficiente de correlação de Pearson                               |
| $R_i$       | Resistência não linear das camadas granulares                       |
| $R_Z$       | Resistência dos grãos                                               |
| Sacr-01     | Amostra 01 de sacrifício utilizada no ensaio de impulso de corrente |
| Sacr-02     | Amostra 02 de sacrifício utilizada no ensaio de impulso de corrente |
| T           | Temperatura dos varistores a ZnO                                    |
| $T_a$       | Temperatura ambiente                                                |
| $T_C$       | Duração virtual da crista do impulso                                |
| $t_m$       | Instante correspondente ao valor máximo                             |
| $T_x$       | Temperatura inicial da faixa considerada                            |
| $T_y$       | Temperatura final da faixa considerada                              |
| $T_y - T_x$ | Faixa mínima de temperatura para a temperatura ambiente             |
| U           | Curva de tensão                                                     |
| $U_0$       | Degrau de tensão do pulso de carga, injetada pelo calibrador        |
| $U_{\sim}$  | Fonte de tensão                                                     |
| $U_A$       | Tensão de origem atmosférica                                        |
| $U_P$       | Tensão de pico da onda                                              |
| $u_R(t)$    | Tensão no ramo resistivo em função do tempo                         |
| $u_t(t)$    | Tensão total aplicada em função do tempo                            |
| $u_{Rk}$    | Valor discreto da tensão resistiva na k-ésima amostra               |
| V           | Tensão                                                              |
| V1          | Tensão 1                                                            |
| V2          | Tensão 2                                                            |
| VL          | Tensão de carga do gerador                                          |
| $V_{res}$   | Tensão residual a impulso de corrente de manobra                    |
| W           | Energia absorvida pelo corpo de prova                               |

|           |                                                  |
|-----------|--------------------------------------------------|
| $W_c$     | Energia de ativação                              |
| $x_i$     | Valor observado da variável $x$                  |
| $\bar{x}$ | Média da variável $x$                            |
| $y_i$     | Valor observado da variável $y$                  |
| $\bar{y}$ | Média da variável $y$                            |
| $x_k$     | Valor instantâneo do sinal na $k$ -ésima amostra |
| $X_{RMS}$ | Valor eficaz do sinal analisado                  |
| $Z$       | Filtro em alta tensão                            |
| $Z(f)$    | Impedância de transferência                      |
| $Z_G$     | Impedância de surto do gerador                   |
| $Z_{mi}$  | Impedância de medição                            |

## SUMÁRIO

|                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMENTOS .....                                                                           | III  |
| DEDICATÓRIA.....                                                                               | IV   |
| RESUMO.....                                                                                    | V    |
| ABSTRACT.....                                                                                  | VI   |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                         | VII  |
| LISTA DE TABELAS .....                                                                         | XIII |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....                                                           | XIV  |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                                                        | XVI  |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                            | 23   |
| 1.1. Qualificação do Principal Problema a Ser Abordado .....                                   | 23   |
| 1.2. Justificativa Científica Para o Tema .....                                                | 24   |
| 1.3. Objetivos .....                                                                           | 25   |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO .....                                                                   | 26   |
| 2.1. Para-raios.....                                                                           | 26   |
| 2.1.1. Revisão histórica dos para-raios.....                                                   | 27   |
| 2.1.2. Características gerais dos para-raios a ZnO .....                                       | 30   |
| 2.1.3. Fatores para degradação dos para-raios .....                                            | 33   |
| 2.2. Caracterização Estrutural e Elétrica dos Para-raios Frente ao Processo de Degradação..... | 34   |
| 2.2.1. Estabilidade térmica .....                                                              | 34   |
| 2.2.2. Corrente de Fuga .....                                                                  | 37   |
| 2.2.3. Sobretensões.....                                                                       | 38   |
| 2.2.4. Descargas parciais (DP) .....                                                           | 39   |
| 2.2.5. Microestrutura .....                                                                    | 42   |
| 2.2.6. Relação entre os mecanismos de envelhecimento e os parâmetros de monitoramento.....     | 46   |

|          |                                                                                                                   |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.       | ESTADO DA ARTE SOBRE ENVELHECIMENTO DE PARA-RAIOS                                                                 | 47 |
| 4.       | METODOLOGIA                                                                                                       | 51 |
| 4.1.     | Ensaio Elétricos                                                                                                  | 53 |
| 4.1.1.   | Ensaio de descargas parciais                                                                                      | 53 |
| 4.1.1.1. | Procedimentos para medição de descargas parciais em para-raios em laboratório                                     | 56 |
| 4.1.1.2. | Procedimentos para medição de descargas parciais em para-raios em campo                                           | 58 |
| 4.1.2.   | Ensaio de corrente de fuga                                                                                        | 60 |
| 4.1.2.1. | Procedimentos para medição da corrente de fuga                                                                    | 61 |
| 4.1.3.   | Ensaio de impulso de corrente                                                                                     | 68 |
| 4.1.3.1. | Procedimentos para o ensaio de impulso atmosférico                                                                | 69 |
| 4.2.     | Ensaio Microestruturais                                                                                           | 72 |
| 4.2.1.   | Ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC)                                                             | 75 |
| 4.2.2.   | Ensaio de caracterização termogravimétrica (TGA)                                                                  | 76 |
| 4.2.3.   | Ensaio de microscopia ótica de reflexão (MOR)                                                                     | 78 |
| 4.2.4.   | Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) | 79 |
| 4.2.5.   | Ensaio de difratometria de raios X (DRX)                                                                          | 81 |
| 5.       | RESULTADOS E DISCUSSÕES                                                                                           | 83 |
| 5.1.     | Resultados dos Ensaio de Impulsos de Corrente                                                                     | 83 |
| 5.2.     | Resultados das Medições de Descargas Parciais                                                                     | 85 |
| 5.3.     | Resultados das Medições de Corrente de Fuga                                                                       | 88 |
| 5.3.1.   | Corrente de referência                                                                                            | 89 |
| 5.3.2.   | Conteúdo harmônico da componente resistiva                                                                        | 91 |
| 5.3.3.   | Distorção harmônica total da componente resistiva                                                                 | 95 |

|        |                                                  |     |
|--------|--------------------------------------------------|-----|
| 5.3.4. | Potência dissipada .....                         | 97  |
| 5.3.5. | Polaridade da corrente de fuga total .....       | 99  |
| 5.3.6. | Comparação entre os parâmetros monitorados ..... | 100 |
| 5.3.7. | Correlação entre os parâmetros monitorados ..... | 101 |
| 5.4.   | Resultados dos Ensaios Microestruturais .....    | 102 |
| 5.4.1. | MOR.....                                         | 102 |
| 5.4.2. | MEV .....                                        | 106 |
| 5.4.3. | EDS .....                                        | 108 |
| 5.4.4. | DRX .....                                        | 110 |
| 5.4.5. | DSC .....                                        | 112 |
| 5.4.6. | TGA.....                                         | 114 |
| 5.5.   | Comparação de Resultados .....                   | 116 |
| 6.     | CONCLUSÕES.....                                  | 117 |
|        | REFERÊNCIAS.. .....                              | 119 |

## 1. INTRODUÇÃO

De modo a garantir a confiabilidade, a continuidade e a qualidade da energia elétrica até o consumidor, os equipamentos do sistema elétrico de potência (SEP) devem ser avaliados periodicamente, de maneira a verificar sua integridade física e seu funcionamento perante as solicitações do sistema.

Posto isso, nota-se que o SEP é suscetível a sobretensões, tanto de origem interna (provenientes de manobras ou falhas no sistema) quanto de origem externa (relacionadas às descargas atmosféricas). Nesse sentido, é necessário que haja um dispositivo de proteção capaz de limitar o valor de sobretensão antes que esta danifique os demais equipamentos do sistema, como os para-raios [1, 2].

Embora não haja, normalmente, sensores que indiquem a situação operativa desses dispositivos após a energização, os para-raios de distribuição estão sujeitos a falhas e à degradação que podem comprometer a confiabilidade da rede, ocasionar oscilações no sistema e prejuízos econômicos às concessionárias, além de colocar em risco a integridade física do sistema, de trabalhadores e dos consumidores [3].

Nesse contexto, uma série de fatores pode contribuir para a aceleração dos mecanismos de degradação desses dispositivos de proteção, como descargas de longa duração, descargas de alta intensidade e curta duração, reações químicas, perda de estanqueidade, umidade, influência da tensão de operação, degradação do circuito de equalização, corrente de fuga permanente entre os varistores, esforços térmicos e descargas parciais (DP) [2].

A partir dessas considerações, existem diferentes técnicas empregadas para avaliar a condição operacional dos para-raios, tais como a análise da corrente de fuga, a medição de DP, a termografia e os ensaios elétricos especializados. Todavia, a discussão acerca da definição da técnica mais adequada para o monitoramento desses equipamentos ainda apresenta lacunas, visto que cada método apresenta vantagens, limitações e diferentes níveis de sensibilidade na detecção de determinados mecanismos de degradação e tipos de falha [4].

### 1.1. Qualificação do Principal Problema a Ser Abordado

O processo de degradação dos para-raios ocorre de maneira progressiva e tende a modificar as características elétricas, térmicas e estruturais ao longo do tempo, comprometendo a integridade física e a vida útil desses equipamentos [2].

Nesse sentido, observa-se que alterações em parâmetros estruturais e elétricos podem fornecer informações relevantes sobre o processo de envelhecimento e deterioração dos para-

raios. Desse modo, diferentes técnicas vêm sendo empregadas para auxiliar na avaliação desses equipamentos e de sua condição operacional. Dentre as abordagens, destacam-se a medição de descargas parciais, a medição da corrente de fuga e as técnicas de caracterização microestrutural, que permitem obter informações sobre as modificações físicas e elétricas decorrentes dos mecanismos de degradação em laboratório [5, 6].

Em campo, entretanto, as técnicas de diagnóstico são mais limitadas devido às dificuldades operacionais e à inviabilidade de aplicação de técnicas mais invasivas ou destrutivas. Assim, são predominantemente utilizadas técnicas baseadas no monitoramento da corrente de fuga, inspeções visuais e termografia [4].

Estudos recentes mostram que a utilização combinada de diferentes parâmetros pode contribuir para uma avaliação mais consistente da condição dos para-raios, dado que o processo de envelhecimento pode se manifestar de forma distinta em cada dispositivo [5].

A partir dessas considerações, torna-se relevante empregar diferentes técnicas capazes de acompanhar a evolução da degradação dos para-raios e fornecer informações sobre sua condição operacional. Normas nacionais e internacionais estabelecem procedimentos para a realização de ensaios de rotina que avaliam a integridade desses dispositivos, como a medição de DP e a análise da corrente de fuga em laboratório [7, 8, 9]. Todavia, permanece uma discussão quanto à sensibilidade dessas técnicas na identificação dos mecanismos de degradação e à capacidade de refletir as alterações decorrentes do processo de envelhecimento desses dispositivos tanto em laboratório quanto em campo [5].

## **1.2. Justificativa Científica Para o Tema**

As alterações decorrentes do envelhecimento dos para-raios podem comprometer seu desempenho e favorecer a ocorrência de falhas, afetando a continuidade do fornecimento de energia elétrica, a confiabilidade do SEP e ocasionando prejuízos técnicos e econômicos às concessionárias [1, 3]. Diante da relevância dos para-raios para a proteção dos equipamentos do SEP, faz-se necessário compreender os mecanismos associados à degradação e os impactos dessas alterações sobre a condição operacional desses equipamentos.

Nesse contexto, o monitoramento da condição operacional dos para-raios é relevante para avaliar o processo de degradação desses dispositivos, pois os efeitos do envelhecimento podem resultar em alterações elétricas, físicas e estruturais ao longo da vida útil do equipamento [5].

Assim, este trabalho busca contribuir para a compreensão do comportamento de para-raios submetidos ao envelhecimento por impulsos de corrente, investigando diferentes técnicas

de avaliação da degradação, incluindo a medição de descargas parciais, a corrente de fuga e análises microestruturais.

### **1.3. Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar parâmetros elétricos e microestruturais associados ao envelhecimento de para-raios de distribuição submetidos a impulsos de corrente e investigar a sensibilidade desses parâmetros como indicadores do processo de degradação dos dispositivos avaliados.

De modo a atingir o objetivo principal proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar medições de DP e de corrente de fuga nos para-raios novos de distribuição de 15 kV, provenientes de três fabricantes diferentes;
- Submeter as amostras ao ensaio elétrico de corrente suportável de impulso de curta duração, para promover o envelhecimento desses equipamentos;
- Repetir a medição de DP e da corrente de fuga nos para-raios após a realização do ensaio supracitado;
- Realizar análises microestruturais em pelo menos uma amostra nova e uma amostra envelhecida de cada fabricante;
- Investigar o comportamento dos parâmetros obtidos por meio das diferentes técnicas empregadas;
- Analisar a correlação entre o nível de degradação observado e a sensibilidade dos parâmetros avaliados como indicadores do processo de envelhecimento dos para-raios.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta a principal teoria utilizada neste trabalho, a qual é composta pelos seguintes assuntos: para-raios, descargas parciais e ensaios elétricos.

### 2.1. Para-raios

Os para-raios, conhecidos também como supressores de surtos de tensão, são dispositivos de proteção utilizados no controle de sobretensões transitórias no SEP. Esses dispositivos são projetados para absorver, em seu terminal, parte da corrente proveniente da sobretensão, limitando-a ao valor máximo permitido [1]. Os surtos que percorrem a rede podem danificar o equipamento terminal desprotegido, visto que, embora sejam atenuados ao longo do percurso, a sua magnitude pode exceder o nível de isolamento do equipamento elétrico [10].

Os para-raios de óxido metálico são dispositivos de custo e tamanho reduzidos em relação aos demais elementos do SEP; todavia, possuem uma relevante função de proteção que reduz os custos de reparação da rede. Ademais, os para-raios são construtivamente simples, haja vista que são formados por varistores e encapsulados em invólucros de diferentes materiais, como polímeros. Assim, quando ocorre um surto de tensão, percorre pelos varistores uma corrente de descarga, que impede que a tensão nos terminais do para-raios ultrapasse o valor correspondente ao nível básico de isolamento (NBI) dos equipamentos protegidos, de modo a garantir uma margem adequada de segurança e a coordenação de isolamento do sistema [1].

Idealmente, um para-raios inicia a condução com uma tensão superior à nominal, mantendo esse valor de forma linear, com o mínimo possível de variações durante o surto, e cessa a condução após a tensão do para-raios retornar a um valor próximo da nominal. Dessa forma, esse para-raios conduziria a corrente necessária para reduzir a tensão de surto e absorveria a energia associada à sobretensão. Para relacionar a tensão  $V$  e a corrente  $I$  em um para-raios, utiliza-se a Equação (1) [10].

$$I = kV^\alpha \quad (1)$$

Em que  $k$  é uma constante e  $\alpha$  é o coeficiente de não-linearidade dado pela Equação (2).

$$\alpha = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log V_2 - \log V_1} \quad (2)$$

Dado que  $V_1$  e  $V_2$  correspondem, respectivamente, às tensões associadas às correntes  $I_1$  e  $I_2$ .

Na rede elétrica é possível observar para-raios com resistores não lineares que seguem a relação entre tensão e corrente conforme a Figura 1. Esses para-raios são constituídos por

resistores de carboneto de silício (SiC) e centelhadores e por resistores de óxido de zinco (ZnO) e sem centelhadores.

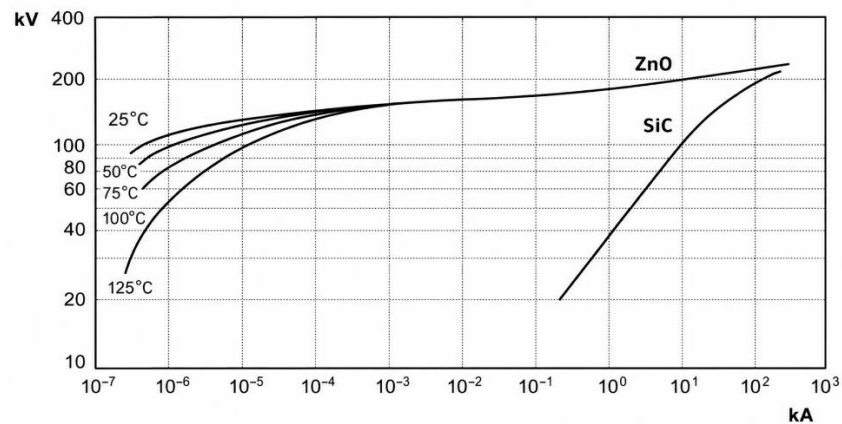


Figura 1. Condições de tensão e de corrente para resistores não lineares de SiC e de ZnO [1].

A partir da Figura 1, nota-se uma diferença de comportamento entre os dois tipos de resistores; isso acontece devido ao resistor de ZnO apresentar um nível superior de não linearidade em comparação ao resistor de SiC [1]. Desse modo, os níveis de tensão próximos aos nominais do resistor a ZnO permitem que a corrente circulante nos para-raios seja minimizada da ordem de microampères ( $\mu\text{A}$ ) [11].

Assim, o tipo de para-raios com resistor de óxido metálico tem sido mais utilizado no sistema elétrico de potência, haja vista que possui uma construção mais simplificada, com pastilhas de ZnO envoltas por um invólucro isolante, sem a necessidade de utilizar centelhadores em série como nos para-raios de SiC, os denominados “convencionais” [1].

#### 2.1.1. Revisão histórica dos para-raios

A partir de 1965, a evolução tecnológica dos para-raios caracterizou-se pela melhoria progressiva de seus componentes em quatro fases principais, ligadas ao progresso da indústria elétrica, conforme a Figura 2: centelhador simples (1A), para-raios do tipo válvula (1B), para-raios com lacunas (*gaps*) ativos (1C) e para-raios de óxido metálico sem lacunas (1D) [10, 12].

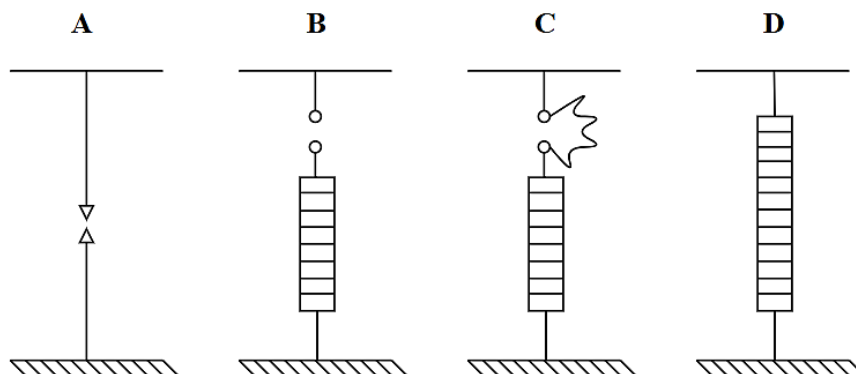


Figura 2. Evolução dos para-raios [1].

O para-raios do tipo centelhador simples (Figura 2-A) foi desenvolvido na primeira metade do século XIX, após a implementação dos primeiros circuitos telegráficos continentais [13]. Além disso, foi o primeiro para-raios utilizado para a proteção contra surtos de tensão, cuja construção consistia em “espaçamentos intencionais no ar”. Atualmente, esse tipo de para-raios é utilizado em dispositivos para redes e sistemas de baixa tensão, telecomunicações e eletrônicos, considerando uma corrente subsequente em frequência nominal inferior a 50 A (limite máximo) [1].

Ele é caracterizado por ser simples e de baixo custo. Porém, como desvantagem, o centelhador não suporta níveis de tensão sem sofrer falha permanente e, caso não seja limitado pelo sistema, por exemplo, por meio de aterramento ressonante, isso pode levar à interrupção de energia [1, 10].

Para contornar essa situação, os para-raios do tipo válvula (Figura 2-B) foram desenvolvidos a partir de 1930, com as descobertas das propriedades do carboneto de silício, para proteger o sistema contra descargas atmosféricas. Para esse projeto, o centelhador executa a função de comutador e o resistor de SiC limita a corrente de seguimento, permitindo o para-raios selar novamente [10]. A Figura 3 ilustra a atuação desse dispositivo de proteção, de maneira que a corrente de seguimento é interrompida no instante em que a corrente em fase com a tensão passa por zero [1].

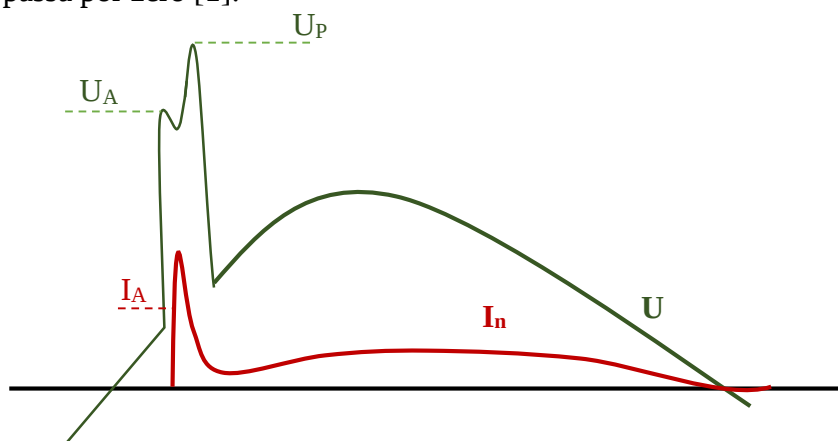


Figura 3. Característica de atuação do para-raios a SiC. Adaptado de [1].

Na Figura 3  $U$  é a curva de tensão;  $U_A$  é a tensão de origem atmosférica;  $U_P$  é a tensão de pico da onda;  $I_A$  é a corrente de origem atmosférica; e  $I_n$  é a corrente subsequente na frequência nominal.

Inicialmente, esse dispositivo convencional era construído em formato de multiunidades, permitindo inspeções periódicas internas. Todavia, os centelhadores eram selados por um invólucro de porcelana que permitia a presença de umidade no equipamento, de

forma a comprometer a integridade física dos resistores de SiC e, conseqüentemente, possibilitando a formação de trincas e a falha por descarga externa.

Mesmo após o aperfeiçoamento do modo de potencial dos centelhadores, que contribuiu para a redução da corrente subsequente e do nível de proteção contra surtos, bem como dos níveis de suportabilidade na isolação dos equipamentos elétricos, esse tipo de para-raios apresentou baixo desempenho em situações de descarga de manobra, o que motivou novos estudos nessa área [13].

Dessa forma, foi iniciada uma revolução tecnológica que culminou na elaboração de para-raios com *gaps* limitadores de corrente (Figura 2-C), principalmente para sistemas de alta tensão. Esse projeto caracterizava-se pela presença de bobinas que geravam um campo magnético durante a passagem da corrente de seguimento. Os arcos elétricos gerados pelas lacunas individuais eram alongados e soprados em direção à câmara, o que reduzia o nível de tensão residual durante o período da corrente de seguimento. Assim, a tensão entre os resistores não lineares era reduzida com a queda da corrente de seguimento, e o arco era extinto antes que a tensão de trabalho atingisse zero [10].

A Figura 4 ilustra o funcionamento desse tipo de para-raios com *gap*, em que o dispositivo permanece isolado durante a operação normal ( $U < U_A$ ) e passa a conduzir apenas durante as sobretensões. Após o centelhamento do *gap*, a corrente do surto é conduzida pelo dispositivo, enquanto o arco elétrico é alongado e resfriado na câmara de extinção, o que reduz a corrente de seguimento até sua interrupção e restabelece a condição isolante dos para-raios.

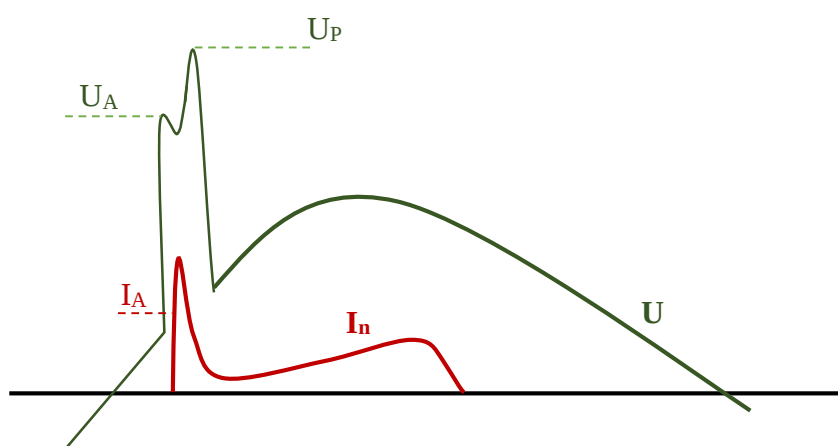


Figura 4. Características de atuação dos para-raios de SiC do tipo "*gap*". Adaptado de [1].

Atualmente, o para-raio de óxido metálico (popularmente conhecido como para-raio de ZnO), exibido na Figura 2-D, é o mais utilizado no SEP por apresentar maiores vantagens operacionais [14]. A Figura 5 ilustra o resultado do processo de confecção de diferentes tipos de varistores a óxido metálico (MOV).



Figura 5. Diferentes tipos de varistores de óxido metálico. Adaptado de [14].

O para-raios em ZnO mostrou-se mais favorável em relação ao SiC no final dos anos 1960, em razão da elevada não linearidade dos varistores, que apresentam alta impedância em condições normais de operação e baixa impedância quando submetidos a sobretensões. Essa característica resulta em correntes de fuga na faixa de  $\mu\text{A}$  em regime permanente e elevada capacidade de absorção de energia durante surtos [10].

Outra particularidade dos para-raios a óxido metálico envolve os seus varistores, os quais possuem alto grau de não linearidade, permitindo que a construção desse dispositivo de proteção exclua a necessidade da inserção de centelhadores. Essa descoberta foi feita por MATSUOKA [15] em 1968 quando estudava as propriedades não lineares dos varistores a óxido metálico (VOM) [11].

Assim, os para-raios de ZnO também obtiveram maior desempenho em reação às descargas de manobra, nos sistemas de corrente contínua (*direct current -DC*) e nas subestações blindadas, em comparação aos para-raios de SiC [13].

#### 2.1.2. Características gerais dos para-raios a ZnO

Na década de 1970, os para-raios a ZnO foram inseridos no mercado, mostrando-se mais eficientes e, construtivamente, mais simples em relação aos para-raios de carboneto de silício. Normalmente, esses para-raios não possuem centelhadores e são formados apenas por varistores a ZnO [1]. A Figura 6 ilustra, de forma construtiva, o para-raios a ZnO.

Com a inserção dos para-raios a ZnO, foi possível observar as seguintes mudanças na característica de proteção desses dispositivos [10]:

- Eliminação de resistores e capacitores de graduação, contribuindo para a redução de peças para a confecção dos para-raios;

- Energia absorvida pelo resistor não linear representa uma fração da energia de descarga da linha de transmissão, haja vista que não há corrente de seguimento. Assim, é possível conectar os varistores em paralelo, a fim de aumentar a capacidade de absorção dos para-raios;
- Menor tensão residual;
- Maior nível de proteção;
- Rápida capacidade de comutação em comparação aos para-raios com centelhador.

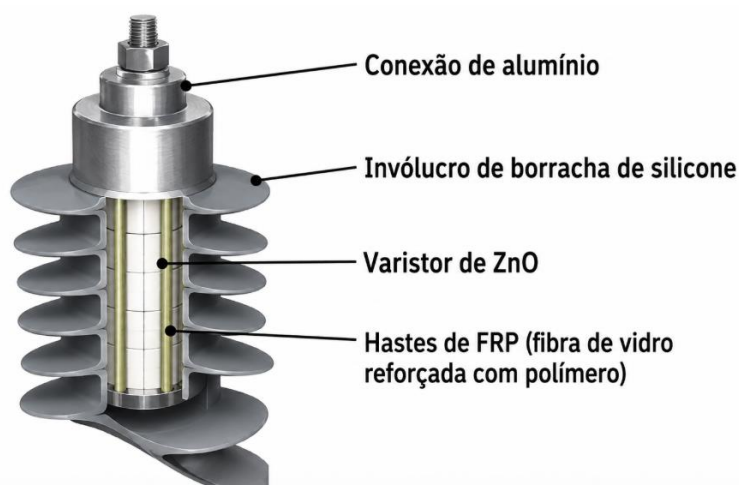


Figura 6. Desenho construtivo de um para-raio de ZnO. Adaptado de [16].

Conforme a Figura 6, os varistores de ZnO são empilhados no interior do invólucro (polimérico ou de porcelana), podendo ser introduzidos com espaçadores metálicos, de modo a preencher a altura restante e dissipar calor após uma descarga. O conjunto constituído por espaçadores e varistores é mantido sob pressão axial pela mola de compressão [1].

Os para-raios a ZnO com invólucros poliméricos vêm substituindo os de invólucros cerâmicos, embora ainda seja visualizada no SEP a presença desses últimos. Como justificativa dessa mudança, observa-se que os invólucros do tipo polimérico são mais leves e apresentam menor risco de fragmentação em comparação aos cerâmicos. Outra vantagem seria sua aplicação em ambientes poluídos, devido ao material apresentar pouco espaço vazio em seu interior, o que dificulta a penetração de umidade e de poluentes, bem como o aparecimento de descargas parciais [17].

Além disso, hastes de FRP (*Fiberglass Reinforced Plastic*) mantêm os varistores centralizados e evitam que se desloquem radialmente.

O varistor utilizado nesse dispositivo é composto por 90% de ZnO e 10% de aditivos, na forma de óxidos de terras raras, como bismuto (Bi), antimônio (Sb), cobalto (Co) e manganês (Mn). Para a confecção desses varistores, os componentes são misturados em pó, granulados,

prensados em moldes cilíndricos ou toroidais, sinterizados, lapidados e, por fim, revestidos com alumínio (Al) ou zinco (Zn) e com esmalte [14]. A Figura 7 exibe a estrutura do varistor de para-raios de ZnO observada por um microscópio.

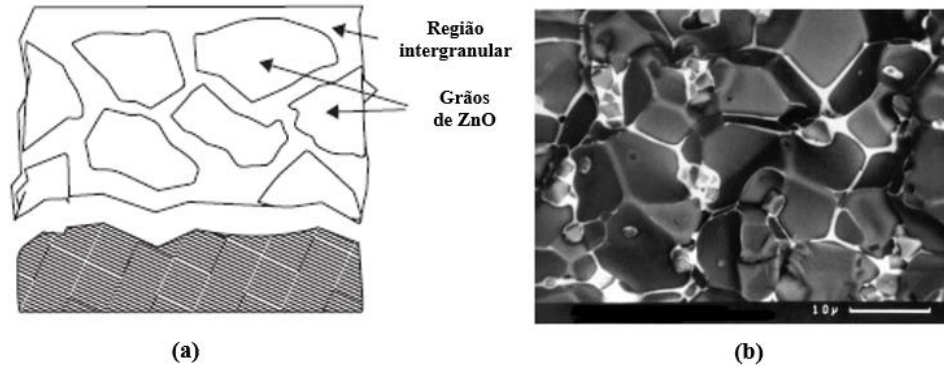


Figura 7. Desenho esquemático da microestrutura do varistor a ZnO em **a** [10]. Imagem no microscópio do varistor a ZnO em **b** (grão de ZnO em preto) [18].

As propriedades elétricas dos para-raios a ZnO estão diretamente relacionadas a sua microestrutura. No microscópio, o varistor apresenta cristais ou grãos de ZnO com tamanho entre 10 μm e 20 μm. Esses grãos possuem elevada condutividade elétrica, correspondente a uma resistividade próxima a 0,01 Ωm no núcleo, enquanto as barreiras de potencial eletrostático (denominadas duplas barreiras de Schottky (DBS) [19]) são formadas nas regiões intergranulares. A parte isolante do grão é responsável por controlar o fluxo de corrente na região pré-ruptura, na ruptura e na parte inferior da região de recuperação [18]. A Figura 8 exibe o circuito equivalente que representa a microestrutura do disco de ZnO.

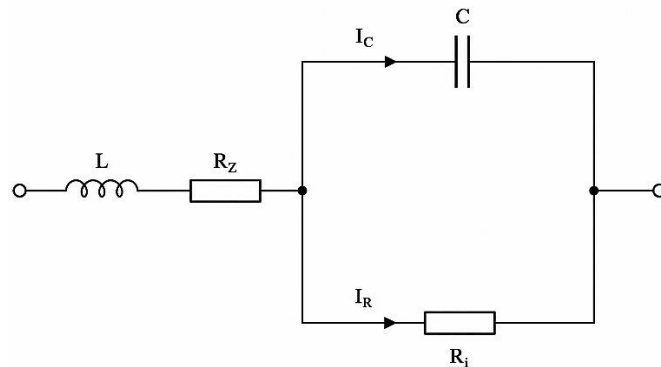


Figura 8. Circuito equivalente do disco a ZnO. Adaptado de [20].

Em que  $R_i$  representa a resistência não linear das regiões intergranulares, dado que a resistividade ( $\rho$ ) pode variar entre  $10^8 \Omega\text{m}$  a  $0,01 \Omega\text{m}$ , tomando como referência a intensidade do campo elétrico;  $C$  é a capacitância equivalente associada às regiões intergranulares. Seu valor depende da constante dielétrica relativa do material, que pode variar entre 500 e 1220, dependendo do processo de fabricação;  $R_Z$  é a resistência dos grãos de ZnO com  $\rho$  igual a 0,01

$\Omega m$ ;  $L$  é a indutância do disco, cujo valor é determinado pela geometria do fluxo; e  $I_R$  e  $I_C$  são os componentes da corrente que percorrem o disco de ZnO [20].

### 2.1.3. Fatores para degradação dos para-raios

Os varistores dos para-raios podem ser degradados pelos seguintes fatores: reações químicas com os materiais circundantes, esforço de tensão e altos valores de corrente. O primeiro fator decorre de moléculas ou gases inadequados nos materiais circundantes, produzidos, por exemplo, durante a operação dos para-raios, por descargas parciais no interior do invólucro, que reagem quimicamente com os óxidos na camada granular, prejudicando a isolação [20].

O segundo fator decorre do tempo de vida útil do material granular, cujo grau de envelhecimento está diretamente relacionado à qualidade e à natureza da camada granular dos para-raios [20]. Como a condução elétrica em baixas correntes é governada por mecanismos termicamente ativados, a característica V-I dos varistores depende significativamente da temperatura. A elevação da temperatura reduz a barreira de potencial nas regiões intergranulares, o que facilita a movimentação de portadores de carga e aumenta a corrente de fuga resistiva. Esse fenômeno intensifica a potência dissipada e pode acelerar os mecanismos de degradação elétrica e microestrutural do varistor [10].

Por fim, o terceiro fator, devido às altas correntes nos varistores, tende a produzir uma densidade de corrente excessiva na camada granular, comprometendo-a parcialmente [20].

Além disso, fatores como a composição e o processo de fabricação, a homogeneidade, o projeto e o arranjo físico, a poluição e a capacidade de absorção também podem acelerar a degradação dos para-raios [10, 21], conforme as descrições exibidas a seguir:

- composição e processos de fabricação: a composição química, a quantidade de dopantes e as condições de sinterização influenciam diretamente o coeficiente de não linearidade dos varistores de ZnO. Dessa forma, observam-se correntes de fuga elevadas pelo material, as quais aceleram a degradação [22, 23]. De acordo com [10], as especificações da corrente de fuga estão diretamente relacionadas à composição e ao processo de fabricação;
- homogeneidade: uma vez que o material ZnO não é uniforme, a condutividade não homogênea provoca a dissipação de energia heterogênea. Assim, após um surto de tensão, um superaquecimento local tende a causar modificações irreversíveis nas propriedades dos varistores, determinadas pelos caminhos percorridos pela corrente [10];

- projeto e arranjo físico dos para-raios: em virtude da capacidade de dissipação de calor do invólucro completo e da distribuição de tensão ao longo da coluna dos para-raios, pode ser visualizada uma aceleração da degradação dos para-raios. Essa situação pode ocorrer, dado que a tensão ao longo do dispositivo de proteção é distorcida por capacitâncias parasitas, o que aumenta a distribuição não uniforme da tensão [10];
- poluição: esse fenômeno está ligado ao efeito corona e às descargas parciais, os quais podem provocar erosão na superfície do dispositivo de proteção e falhas no colar de proteção dos varistores, contribuindo para a degradação do ZnO [24];
- capacidade de absorção de surtos: após a aplicação de um surto de comutação, de raios ou de sobretensões temporárias, observa-se uma degradação mensurável das propriedades elétricas do ZnO.

Desse modo, o grau de degradação pode ser utilizado como ferramenta para indicar a confiabilidade do varistor e prever a vida útil dos para-raios a ZnO [10].

## **2.2. Caracterização Estrutural e Elétrica dos Para-raios Frente ao Processo de Degradação**

A função operacional do para-raios pode ser descrita como um meio para o funcionamento seguro do SEP, sem perturbações decorrentes de operações de manobras e de descargas atmosféricas na rede. Todavia, a degradação desse dispositivo de proteção e a perda das características não lineares dos varistores de ZnO promovem o envelhecimento, alterações nas propriedades estruturais e elétricas, e a diminuição da expectativa de vida útil dos para-raios [25].

Nesse sentido, diferentes parâmetros podem ser utilizados para acompanhar a evolução do processo de degradação e auxiliar na avaliação dos mecanismos associados ao envelhecimento [5, 25]. Dessa forma, esta seção descreve alguns dos parâmetros empregados na caracterização elétrica e estrutural desses equipamentos, tais como estabilidade térmica, corrente de fuga, sobretensões, descargas parciais e microestrutura.

### **2.2.1. Estabilidade térmica**

Para o melhor desempenho dos para-raios, deve-se considerar as propriedades elétricas e térmicas, bem como o projeto de instalação. Posto isso, dado que o dispositivo de proteção a ZnO não possui folga em comparação aos de SiC, o aparecimento de uma corrente de fuga através do material sob tensões de trabalho pode causar perdas de energia e aquecimento nos

varistores. Essa situação pode comprometer a estabilidade térmica do equipamento, especialmente em regiões de baixa condutividade térmica [10].

No gráfico da Figura 9, são exibidas as curvas que relacionam a temperatura com a tensão e a corrente, de maneira a ilustrar a instabilidade térmica no para-raios a ZnO.

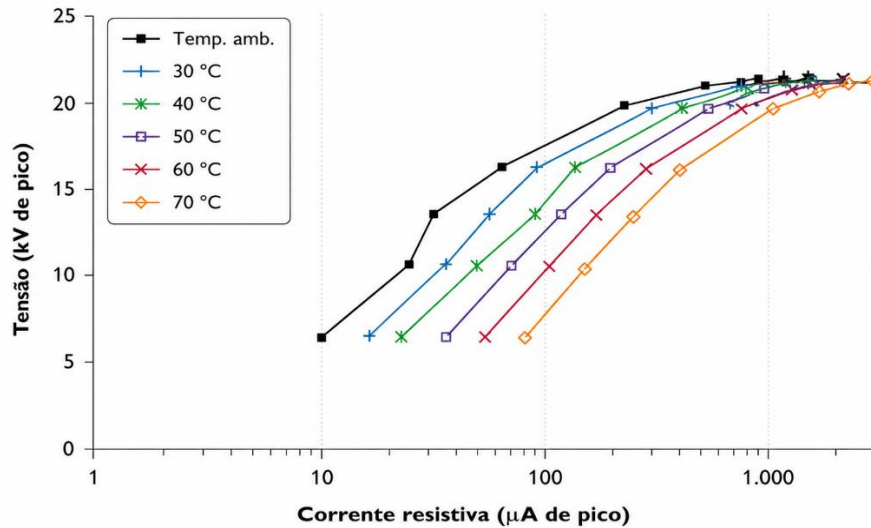


Figura 9. Relação da temperatura com a tensão e a corrente do varistor a ZnO. Adaptado de [10].

A Figura 9 mostra que para o mesmo nível de tensão aplicado, dependendo do valor da temperatura, há um aumento de corrente. Isso ocorre devido à sensibilidade à temperatura na curva de tensão-corrente no regime de baixa condução. Dessa forma, caso o calor não seja dissipado, o para-raio pode apresentar danos irreversíveis devido ao aumento da corrente.

A partir dessa análise, Haddad et al. [10] descreve que a estabilidade elétrica dos para-raios a ZnO é afetada pela temperatura ambiente, pela capacidade de dissipação de calor, pela degradação do impulso e pelo envelhecimento. Nesse sentido, para assegurar a estabilidade térmica, é necessário que haja equilíbrio entre a dissipação de energia no elemento e a dissipação de calor para o ambiente. Assim, próximo ao equilíbrio térmico, pode-se estabelecer a capacidade de dissipação térmica dos para-raios ( $Q$ ) pela Equação (3).

$$Q = C_T \cdot (T - T_a) \quad (3)$$

Em que  $T$  é a temperatura dos varistores a ZnO,  $T_a$  é a temperatura ambiente e  $C_T$  é o fator de dissipação térmica.

Já a geração de calor ( $P$ ) pode ser calculada pela Equação (4):

$$P = A \cdot e^{-\frac{W_c}{kT}} \quad (4)$$

Dado que  $W_c$  é a energia de ativação,  $T$  é a temperatura do material e  $A$  é dependente do nível de tensão aplicado e das dimensões físicas dos elementos.

Para a temperatura ambiente, a máxima capacidade de energia dissipada ( $E_d$ ) é dada pela Equação (5):

$$E_d(T_a) = m \cdot C_{Tm} \cdot (T_y - T_x) \quad (5)$$

Em que  $m$  é a massa do elemento da válvula,  $C_{Tm}$  é a capacidade de calor por unidade de massa ( $0,54 \text{ J/g/}^\circ\text{C}$ ) e  $(T_y - T_x)$  é a faixa de máxima temperatura para  $T_a$  [10].

A Figura 10 ilustra as perdas de potência dos varistores em um para-raios quando a tensão  $U_C$  é aplicada. Nesse sentido, observa-se que a perda de potência  $P$  aumenta exponencialmente com  $T$ , o que resulta no aumento do aquecimento do componente ativo. Já o resfriamento dos varistores ocorre por meio do fluxo de calor  $Q$  da parte ativa dos dispositivos de proteção para o exterior [26].

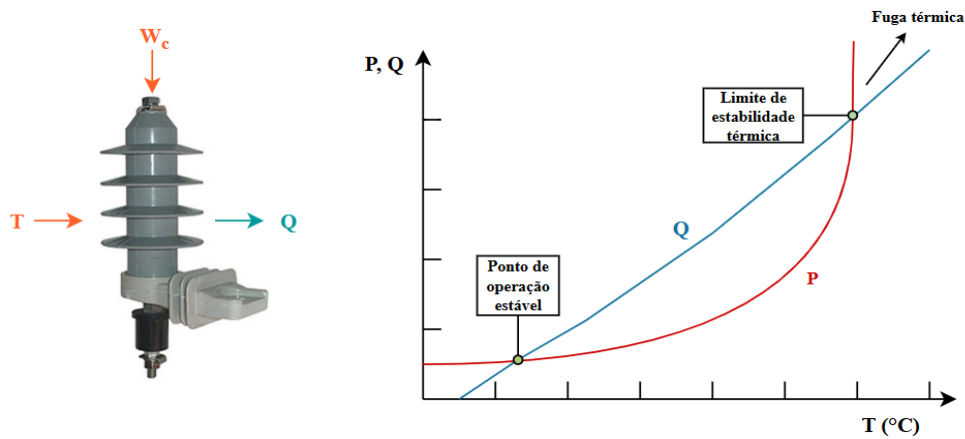


Figura 10. Representação da ocorrência de instabilidade térmica dos para-raios. Adaptado de [26].

Para temperaturas acima do ponto crítico,  $P$  é maior que  $Q$ ; assim, o resfriamento não é suficiente para dissipar o calor provocado por  $P$ . Como consequência, os varistores continuam a aquecer até serem destruídos pelo superaquecimento, no fenômeno conhecido como “avalanche térmica” ou “fuga térmica”.

Para valores de  $P$  abaixo do ponto crítico, o calor tende a ser dissipado mais rapidamente, visto que  $P < Q$ , o que permite que a parte ativa dos para-raios volte à estabilidade após o tempo de resfriamento. Nessa região, o para-raios tem a capacidade de limitar a sobretensão, sem ocorrência de danos para a vida útil desse dispositivo de proteção [26].

### 2.2.2. Corrente de Fuga

Durante a degradação dos varistores, é possível observar o aumento das perdas de potência, o que tende a contribuir para um equilíbrio térmico acima dos limites físicos dos para-raios. Esse estado de degradação pode ser detectado pela medição de corrente de fuga, cuja estimulação é dada pela excitação térmica das cargas [25, 27].

No processo de deterioração das propriedades isolantes dos para-raios, observa-se um aumento na parcela resistiva da corrente de fuga e em suas componentes harmônicas, principalmente na terceira harmônica [28, 29]. A Figura 11 exibe as curvas das correntes resistivas de fuga para a condição do varistor saudável (em azul) e para a condição de degradação (em vermelho).

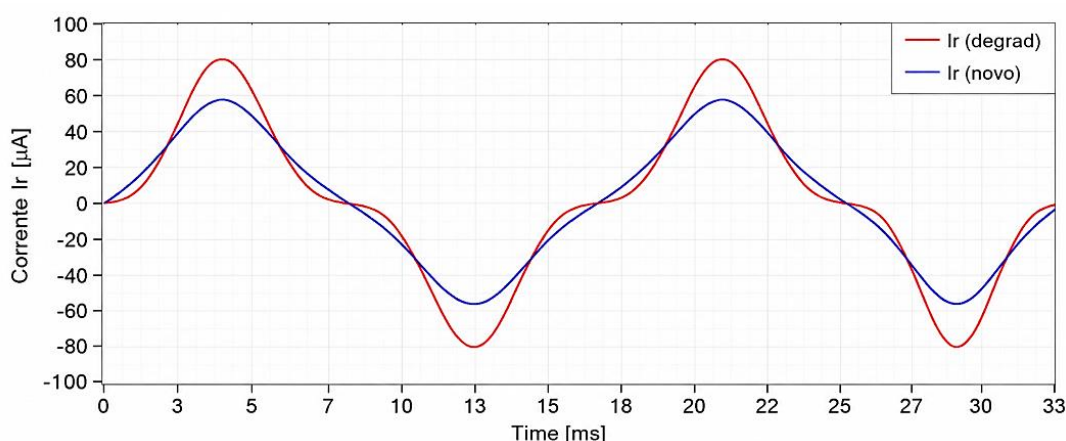


Figura 11. Componentes resistivas de corrente de fuga. Adaptado de [30].

De acordo com [27], existem duas situações distintas de degradação: exposição permanente e constante do material a campos elétricos e restrição à capacidade de dissipação de energia do varistor. A primeira refere-se ao envelhecimento causado pela polarização do varistor ao longo da vida útil. Já a segunda está diretamente relacionada ao aumento da corrente de fuga em função do tempo e ao aumento contínuo da temperatura quando se aplica uma tensão permanente ao varistor. Dessa forma, na ocorrência de uma sobretensão, o para-raios é induzido ao acúmulo e à dissipação de energia excedente, contribuindo para o aumento de temperatura do varistor em até 40 °C.

Nesse cenário, a diferença de temperatura entre dois pontos do varistor pode ser suficiente para romper seu equilíbrio térmico e ocasionar a “avalanche térmica” nos para-raios, devido a corrente ser afetada pelo aumento das cargas livres e elevar-se concomitantemente à elevação de temperatura. Assim, esse processo de fuga térmica é uma condição intrínseca e, geralmente, é visualizado no final da vida útil do para-raios a ZnO, que pode contribuir para o processo de envelhecimento ou até com a explosão do dispositivo de proteção [25].

Em para-raios de distribuição instalados em campo, utiliza-se um desligador em série, de forma a desconectar os para-raios do sistema quando a corrente for superior ao esperado para o correto funcionamento do dispositivo. Nesse sentido, esses desligadores atuam por meio da explosão de compartimentos de pólvora [31].

### 2.2.3. Sobreensões

Segundo Salles et al. [32], o envelhecimento dos para-raios está relacionado a diferentes fatores operacionais e ambientais. Entre esses fatores, as sobreensões destacam-se como uma das principais fontes de solicitação elétrica para os para-raios, podendo contribuir para alterações em suas propriedades elétricas e estruturais ao longo do tempo [10, 20]. Considerando que, nesta pesquisa, o envelhecimento de para-raios é realizado por meio de impulsos atmosféricos de corrente, esta subseção descreve as principais características das sobreensões.

As sobreensões em um sistema podem ser caracterizadas por diferentes amplitudes e durações. Em relação à atuação dos para-raios, dois tipos de sobreensões podem ser destacados: originadas de impulsos atmosféricos e resultantes de operações de manobra [10, 33]. A Figura 12 exibe os diferentes tipos de sobreensões catalogados pela IEC 60071-4 [33], de maneira a relacioná-los com a amplitude e a duração do fenômeno para cada caso.

As descargas atmosféricas constituem uma das principais fontes de sobreensões transitórias no SEP, uma vez que podem apresentar correntes na ordem de centenas de quiloampères (kA) e tensões na ordem de megavolts (MV), de modo a gerar transitórios na rede capazes de provocar falhas de isolamento e danos aos equipamentos [34]. Em função da energia associada a esses eventos, a incidência repetitiva de impulsos tende a contribuir para processos degradativos em dispositivos de proteção, como os para-raios [11].

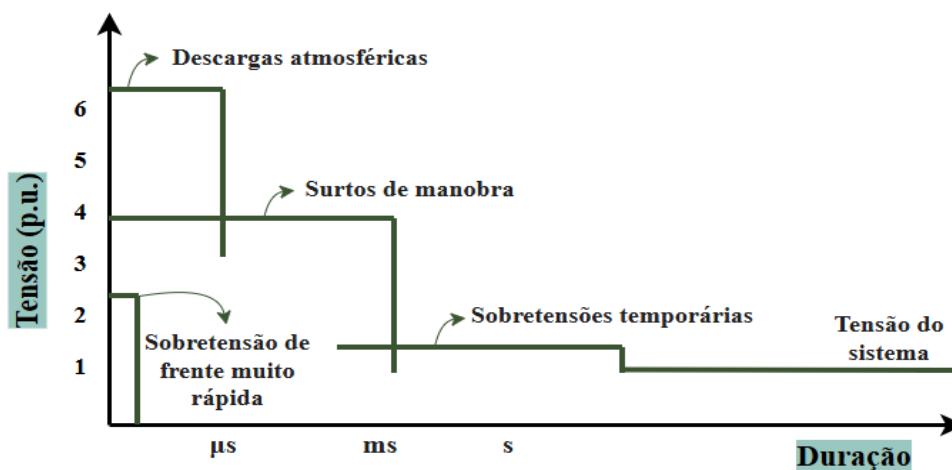


Figura 12. Tipos de sobreensão. Adaptado de [33].

Além dos efeitos imediatos associados à atuação dos para-raios durante os surtos, a aplicação repetitiva de sobretensões pode provocar alterações acumulativas nos varistores à base de ZnO, favorecendo mecanismos associados ao processo de degradação [35].

Quando submetidos a uma sobretensão, os para-raios entram em condução e passam a escoar para a terra a corrente associada ao surto, dissipando parte da energia incidente na forma de calor. Estudos mostram que a exposição sucessiva a esses impulsos pode contribuir para alterações na corrente de fuga, redução da capacidade de absorção de energia, aumento das perdas elétricas e modificações microestruturais decorrentes do aquecimento localizado e dos mecanismos internos de degradação [11, 20].

Dessa maneira, a análise dos efeitos associados às sobretensões torna-se relevante para a compreensão dos parâmetros que podem atuar como indicadores do processo de envelhecimento dos para-raios.

#### 2.2.4. Descargas parciais (DP)

As descargas parciais são definidas pela norma ABNT NBR IEC 60270 [7] como um fenômeno localizado, na forma de pulso com duração inferior a 1  $\mu$ s, que curto-circuita parcialmente o isolante entre os condutores, podendo ocorrer nas proximidades desses. Além disso, as DP são causadas por concentrações locais de tensão elétrica no sistema de isolamento.

Em objetos sob ensaio, as DP são caracterizadas por pulsos de corrente [7], os quais são medidos em circuitos específicos e produzidos por um detector do sinal de corrente ou de tensão proporcional à carga [36, 37]. A Figura 13 apresenta dois exemplos de DP, caracterizados por pulsos de corrente em função do tempo no ar.

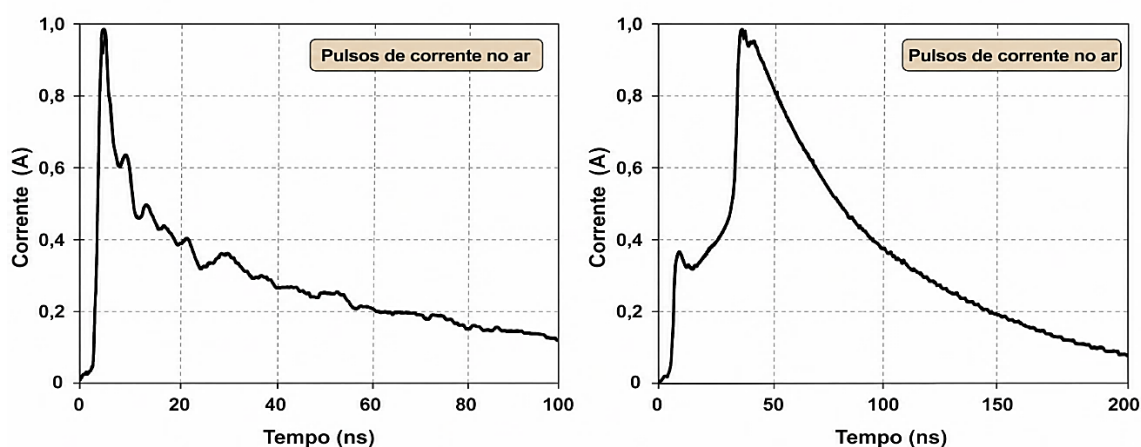


Figura 13. Sinais de DP no ar. Adaptado de [37].

De acordo com [38], a principal falha dos equipamentos está relacionada à degradação do sistema de isolamento. Como justificativa, durante a operação de qualquer equipamento

elétrico, as tensões do campo elétrico distribuem-se uniformemente pelo sistema de isolamento saudável entre os condutores. Todavia, quando o isolante apresenta avarias, como impurezas, vazios, bolhas de ar ou trilhamento, observa-se uma distribuição não uniforme das tensões do campo elétrico no sistema de isolamento.

A partir da intensidade do defeito, o nível de DP varia em consonância com a tensão aplicada. Desse modo, esse fenômeno tende a intensificar os defeitos já existentes no equipamento, deteriorando o desempenho do sistema de isolamento, provocando incêndios, inoperabilidade do equipamento e danos irreparáveis ao SEP [39].

Além de as DP levarem ao envelhecimento e à degradação do sistema de isolamento dos equipamentos elétricos, esse fenômeno também é um indicativo para o estudo e a avaliação das irregularidades desses dispositivos [40]. Os resultados obtidos a partir de ensaios e do monitoramento de DP fornecem informações importantes sobre a qualidade do sistema de isolamento, bem como sobre as consequências desse fenômeno para a saúde geral do equipamento elétrico. Considerando que os sinais de DP, na maioria dos casos, já estão presentes antes da falha final, é possível gerenciar as atividades das DP ao longo da vida útil do instrumento elétrico e tomar decisões, de maneira a manter a qualidade de energia e confiabilidade do SEP [41].

As DP são formadas por concentrações de diferença de potencial elétrico, decorrentes de uma ação inicial de agentes químicos, elétricos, mecânicos, térmicos ou ambientais [10]. Em 1995, elas foram classificadas como internas, superficiais e externas [40] (Figura 14), com base em sua localização e no tipo de formação.

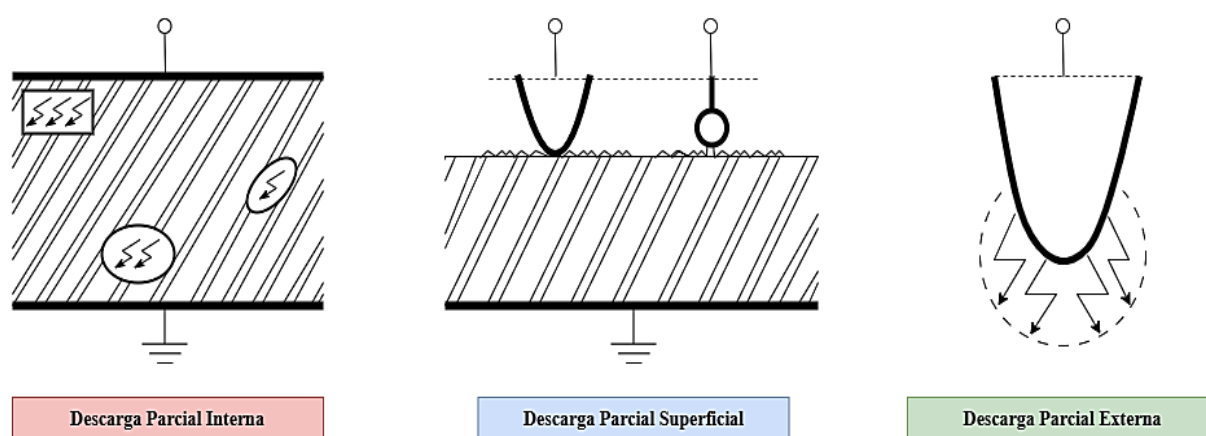


Figura 14. Classificação das DP.

Nos para-raios, a descarga parcial produzida promove a redução da concentração de oxigênio no interior dos para-raios e a produção de gases nocivos, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e ácido nítrico

( $\text{HNO}_3$ ). A partir desses produtos, a barreira potencial de ZnO diminui, modificando a estrutura eletroquímica e a característica não linear dos varistores, além de causar danos internos à isolamento dos para-raios e elevar a corrente de fuga [42].

Segundo [32], as descargas parciais na superfície externa dos para-raios e o superaquecimento devido à corrente de fuga são os principais motivos de falha prematura desses dispositivos. Essa afirmação é justificada pelos efeitos da DP, que implicam modificações na barreira intercristalina dos para-raios, ocasionando alterações irreversíveis de tensão e corrente, além da elevação da corrente de fuga e do aquecimento local. A combinação desses fatores provoca a aceleração do envelhecimento e a redução da eficiência desses equipamentos de proteção.

Considerando o comportamento dos para-raios como um dielétrico em condições normais e em condições às quais são submetidos a campos elétricos entre seus terminais, a descarga parcial torna-se um problema. Isso é justificado pelo comprometimento da impermeabilidade do invólucro do dispositivo de proteção na presença de DP. De acordo com a literatura, as DP que ocorrem entre a coluna do varistor e a superfície do invólucro são as mais prejudiciais, visto que criam aberturas no invólucro de modo a facilitar a presença de umidade [5]. A Figura 15 ilustra esse tipo de DP no para-raios a ZnO.

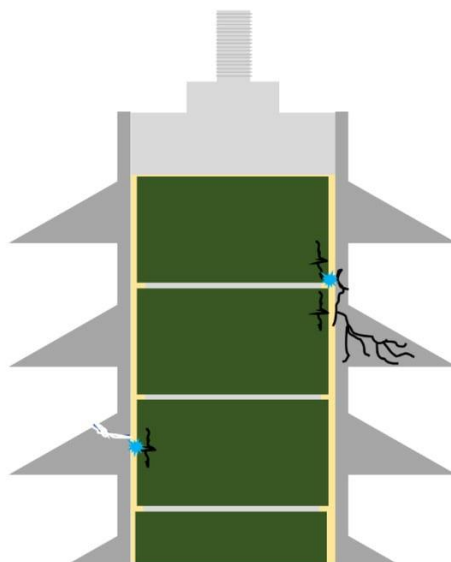


Figura 15. DP entre varistores e a superfície do invólucro [5].

Um dos fatores que intensificam a falha prematura nos para-raios é a exposição destes à deposição de poluentes ambientais. Como exemplo, a poluição superficial, além de reduzir a vida útil dos para-raios, intensifica as DP e as perdas de potência [5]. A Figura 16 exemplifica a DP superficial em para-raios de porcelana cobertos por poluição salina.

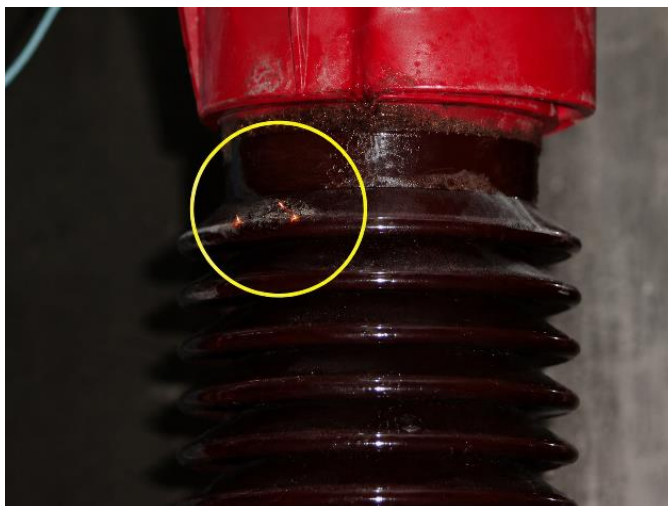


Figura 16. Descarga parcial superficial em para-raios de ZnO submetidos à poluição salina [2].

De maneira a monitorar as DP, são realizadas medições desse fenômeno em ensaios de rotina, a fim de verificar se os objetos sob teste estão livres de DP. Esses ensaios podem ser empregados na avaliação da condição do sistema de isolamento de equipamentos já instalados e em operação, de forma a detectar precocemente os defeitos que podem evoluir para falhas e comprometer a confiabilidade do sistema [40].

#### 2.2.5. Microestrutura

As mudanças na microestrutura desses dispositivos podem ser avaliadas por meio de técnicas de caracterização física e microestrutural. Além disso, ensaios de caracterização elétrica permite inferir alterações nas DBS localizadas nas regiões intergranulares, uma vez que modificações microestruturais afetam diretamente o mecanismo de condução elétrica dos varistores [43].

Essas DBS são uma analogia ao modelo de barreira de Schottky, que se forma devido à diferença de energia entre um metal e um semicondutor de tipo n. Nesse modelo, considerando que a concentração de energia é maior no semicondutor, há uma transferência de elétrons para o metal na banda de condução, quando esses estão em contato, até atingir o equilíbrio [44].

Desse modo, essa transferência de elétrons forma uma dupla camada de depleção nos contornos dos grãos fronteiros, devido às cargas espaciais positivas nas fronteiras dos grãos, conforme ilustrado na Figura 17. No caso dos varistores de ZnO, caracterizam-se as camadas de depleção em duas barreiras de Schottky conectadas [44], as quais são conhecidas pela característica não linear dos para-raios a ZnO [43].

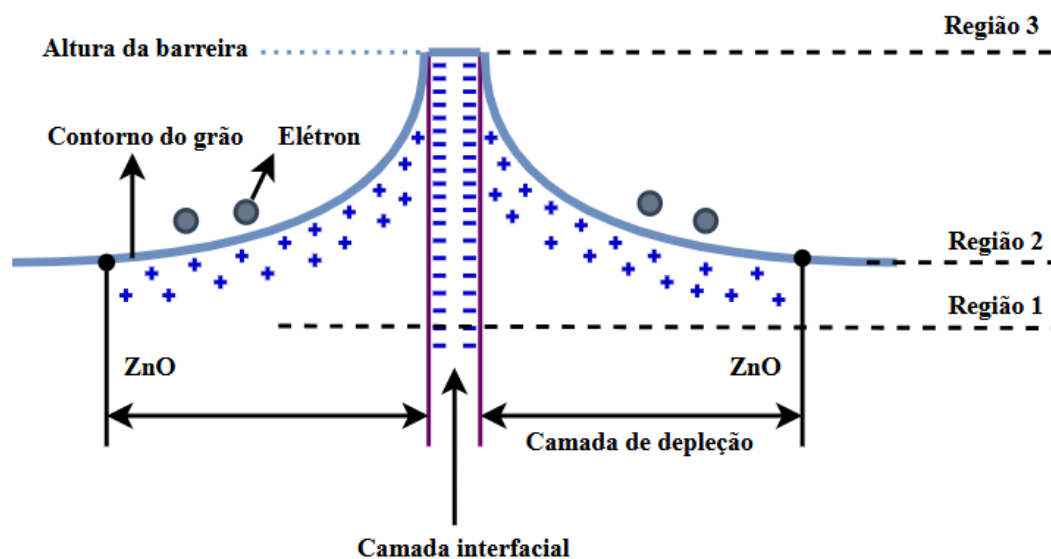


Figura 17. Modelo da barreira dupla de Schottky. Adaptado de [19, 45].

Conforme ilustrado na Figura 17, existem três regiões principais nas DBS, as quais são descritas a seguir [11]:

- **Região um:** o campo elétrico é insuficiente tanto para inserir os elétrons na banda de condução quanto para reduzir a camada de depleção na região de contato intergranular;
- **Região dois:** observa-se uma redução da camada de depleção. Esta região é responsável pelo coeficiente de não-linearidade do varistor, de maneira que o aumento da altura da barreira de energia nessa região provoca um maior aumento de não-linearidade.
- **Região três:** verifica-se a redução completa da camada de depleção intragranular e a injeção de elétrons na banda de condução, o que resulta no livre fluxo elétrico.

Nessa condição sem degradação dos varistores, após uma descarga elétrica, a tendência é das cargas voltarem ao equilíbrio, de modo que a DBS volte à disposição inicial [11].

Já na condição de envelhecimento dos para-raios, a degradação inicia-se nos contornos de grãos, a partir do movimento de íons na camada de depleção [44]. Essa situação ocorre quando o para-raios é submetido a um campo elétrico que ultrapasse a tensão de ruptura (produto do número de contornos de grão entre os eletrodos e da tensão em um único contorno) de seus varistores, como em uma descarga atmosférica [11].

Posto isso, observa-se uma polarização da banda de energia por meio da atração e da repulsão entre as cargas. Dessa maneira, há um aumento da camada de depleção no lado reversamente polarizado da DBS devido à migração de elétrons para o contorno do grão e à diminuição de energia, enquanto, no lado diretamente polarizado, há uma diminuição na camada de depleção e um aumento de energia, conforme a Figura 18 [45].

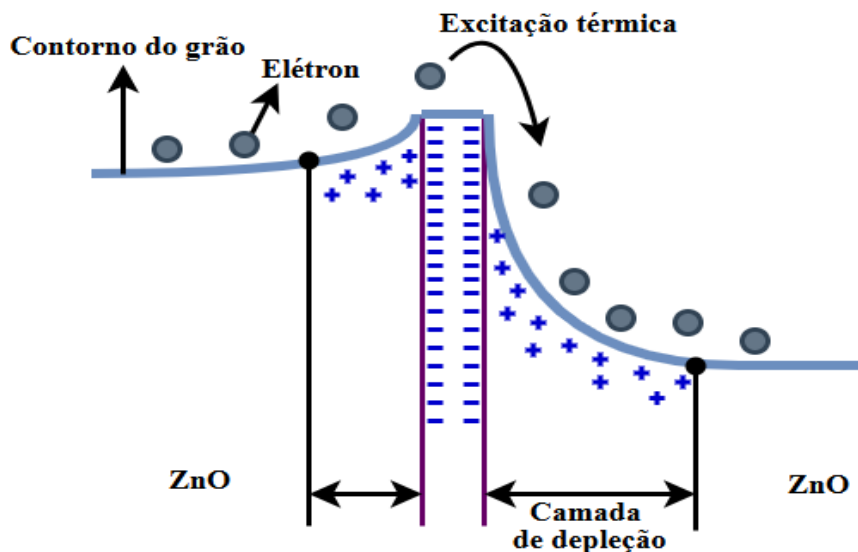


Figura 18. Modelo da barreira dupla de Schottky em desequilíbrio. Adaptado de [19, 45].

Ademais, a polarização dos varistores implica no aumento da componente negativa da corrente de fuga em comparação à componente positiva durante o processo de envelhecimento, devido à diferença de altura da banda de energia entre os lados da DBS. Dessa forma, após o surto, o processo de degradação nos varistores não permite o retorno das DBS ao equilíbrio, haja vista que a migração de íons permanentes aumenta o número de zínco intersticiais em um dos lados da barreira, o que as mantém na disposição da Figura 18 [45].

Após a descarga atmosférica, é possível verificar descargas parciais no interior do varistor, visto que o fenômeno elétrico facilita a vaporização de componentes, resultando em trincas e perfurações no dispositivo. Assim, em estudo de envelhecimento de para-raios, principalmente por meio de impulsos de corrente, são feitas análises dos efeitos da degradação na microestrutura dos varistores, provocada pelas descargas atmosféricas e pela DP, por serem fatores que causam a polarização desses dispositivos [11, 46].

Atualmente, alguns estudos nessa área, como o de [47], apresentaram um varistor de ZnO simples com dopagem de bismuto (Bi), cobalto (Co), manganês (Mn), silício (Si) e boro (B), que demonstrou melhoria na resistência à degradação, aumento na tensão de ruptura de aproximadamente 3000 V/mm e diminuição da corrente de fuga como consequência.

A partir das considerações sobre a relação direta entre as propriedades físico-químicas e os ensaios elétricos dos para-raios, as características da tensão e da corrente nesse dispositivo na Figura 1 são descritas com base nas componentes resistivas e capacitivas, por meio da atuação das barreiras de Schottky, conforme mostrado na Figura 19.

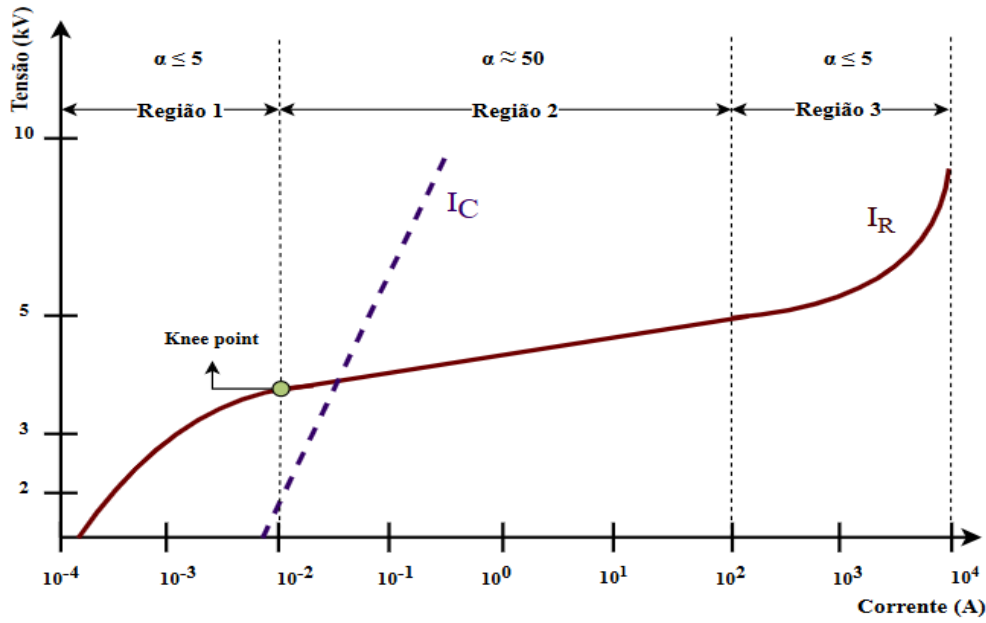


Figura 19. Representação das características de tensão-corrente de um para-raios de ZnO. Adaptado de [18, 20].

Na Figura 19, a componente resistiva é dividida em três principais regiões [20]:

- **Região 1:** região de baixo campo elétrico devido às barreiras de energia na camada granular, o que impede a movimentação de elétrons entre os grãos. Nesse sentido, a densidade de corrente pelo para-raios a óxido metálico é dada pela Equação (6):

$$J_r = J_0 e^{\frac{\sqrt{\frac{Ee^3}{4\pi\epsilon}} - \phi_B}{k\tau}} \quad (6)$$

Dado que  $J_0$  é uma constante que depende do tipo e da geometria da camada granular do material;  $\phi_B$  é a barreira de potencial;  $E$  é a tensão do campo elétrico;  $\epsilon$  é a constante dielétrica;  $k$  é a constante de Boltzmann; e  $\tau$  é a temperatura absoluta.

- **Região 2:** região de campo elétrico médio, devido aos elétrons se movimentarem através das barreiras pelo “efeito túnel”, a partir do campo elétrico na camada granular, atingindo aproximadamente 100 kV/mm. A densidade de corrente é dada pela Equação (7):

$$J_r = J_1 e^{-\frac{A\phi_B^2}{E}} \quad (7)$$

Em que  $J_1$  e  $A$  são constantes específicas do material.

- **Região 3:** região de alto campo elétrico devido à queda de tensão dominante sobre a resistência  $R_Z$  e, conseqüentemente, à aproximação linear gradual da corrente em relação à tensão, conforme a Equação (8).

$$J_r = \frac{E}{\rho} \quad (8)$$

As regiões um, dois e três também podem ser denotadas por regiões de pré-ruptura, não linear e de subida, respectivamente. Assim, utilizando-se a Equação (1) para a caracterização da não linearidade da curva apresentada na Figura 19, a região de pré-ruptura é dependente de baixa temperatura de corrente, em que o coeficiente de temperatura é negativo e a curva é linear com valor de  $\alpha \leq 5$ . Essa região é considerada a área de máxima tensão operacional contínua (MCOV), na qual o ponto em verde (*knee point*) corresponde à tensão de ruptura ou à tensão limite após o para-raio ter iniciado a sua condução [48].

A região não linear corresponde à parte de condução ativa, independente da temperatura do varistor, caracterizada pelo alto valor de  $\alpha$  ( $\approx 50$ ). O dado de  $\alpha$  depende do grau de linearidade da curva, que está relacionada com a presença do óxido de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) na composição do varistor, o qual tem como função segregar a camada intragranular. Além disso, o limite dessa região determina o nível de proteção do dispositivo em relação à tensão residual para a corrente nominal.

Por fim, a região de subida é caracterizada pela proteção contra descargas atmosféricas, com valores de corrente variando entre 1 A e 100 kA e  $\alpha \leq 5$ . Ademais, a terceira região é influenciada pela resistividade do grão, e o nível de proteção é inferior à tensão residual [48].

#### 2.2.6. Relação entre os mecanismos de envelhecimento e os parâmetros de monitoramento

Os mecanismos de degradação discutidos nesta seção refletem-se em alterações elétricas e microestruturais dos para-raios. Nesse contexto, parâmetros associados à corrente de fuga, tais como o conteúdo harmônico, a potência dissipada e a polaridade, bem como as medições de DP e as características microestruturais, apresentam potencial para fornecer informações relevantes sobre a evolução do processo degradativo e a condição operacional dos dispositivos.

Entretanto, a sensibilidade desses parâmetros pode variar em função dos mecanismos de envelhecimento predominantes e das características construtivas dos para-raios. Dessa forma, torna-se relevante investigar como esses parâmetros vêm sendo empregados na literatura para a avaliação do envelhecimento e da condição operacional desses equipamentos, uma vez que constituem as principais ferramentas de análise utilizadas neste trabalho.

### 3. ESTADO DA ARTE SOBRE ENVELHECIMENTO DE PARA-RAIOS

Muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de compreender os mecanismos associados ao envelhecimento de para-raios e de identificar parâmetros que caracterizam a condição de operação desses dispositivos ao longo de sua vida útil.

Assim, diferentes abordagens são empregadas na investigação do processo degradativo dos para-raios, como ensaios de envelhecimento acelerado considerando aplicações sucessivas de impulsos de corrente, solicitações térmicas, monitoramento elétrico e técnicas de caracterização estrutural aplicadas aos dispositivos [5, 11, 32, 31]. Essas abordagens buscam reproduzir, em condições controladas, fenômenos associados à operação real dos para-raios e identificar grandezas capazes de representar as alterações decorrentes do envelhecimento dos dispositivos.

Entre os estudos voltados ao envelhecimento artificial, Salles et al. [32] investigaram os efeitos de solicitações subsequentes de impulso de corrente de curta duração em varistores à base de óxido metálico, a fim de compreender a influência da intensidade e da repetição dos surtos sobre o comportamento dos dispositivos.

Os autores analisaram a evolução de parâmetros elétricos associados ao desempenho dos varistores durante o envelhecimento e observaram que a corrente de fuga está diretamente relacionada à temperatura do varistor no momento da aplicação do impulso. Dessa forma, esse trabalho sugere que um dos fatores para caracterizar a degradação dos varistores é a potência dissipada por eles durante a medição da corrente de fuga, de modo que o aumento dessa potência indica o aumento do nível de degradação do dispositivo, conforme exibido na Figura 20.

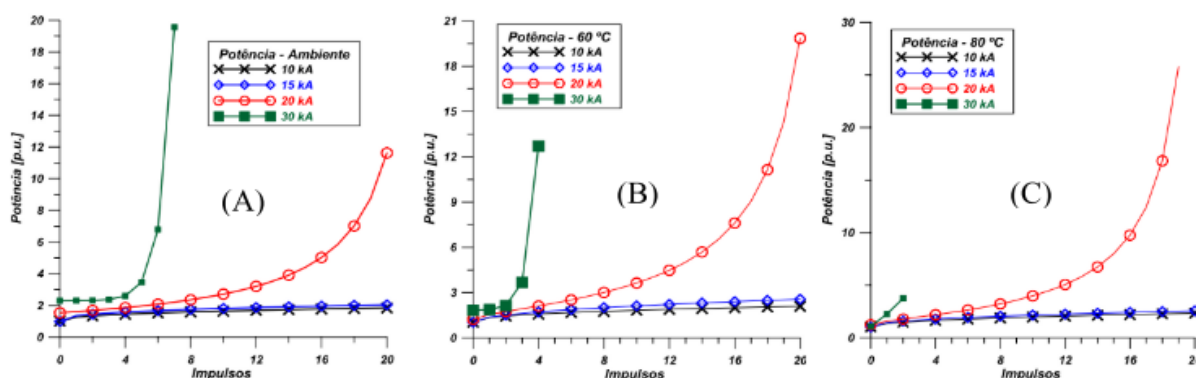


Figura 20. Potência em função do número de impulsos aplicados à temperatura ambiente, a 60 °C e a 80 °C [32].

Em continuidade a essa linha de pesquisa, Nogueira [31], em 2023, avaliou o envelhecimento artificial de varistores submetidos a impulsos de corrente de diferentes formas de onda de curta duração, sob influência de condições térmicas específicas e de diferentes níveis de energia consumida. Nesse sentido, foram realizadas avaliações dos efeitos degradativos por

meio da análise da corrente de fuga, a partir da potência dissipada e das distorções harmônicas associadas, bem como da evolução dos picos resistivos da corrente de fuga em função da tensão de referência especificada.

Desse modo, ao comparar as formas de onda de curta e de longa duração, os autores observaram diferenças relevantes na resposta desses dispositivos ao envelhecimento. Posto isso, os resultados indicaram picos negativos mais elevados na componente resistiva da corrente de fuga, um número maior de impulsos suportados e maior energia absorvida pelas amostras submetidas às formas de onda de curta duração de 4/10  $\mu$ s.

Assim, o autor concluiu que as condições de solicitação elétrica influenciam significativamente o comportamento de degradação dos para-raios. Além disso, foi identificado que os indicadores obtidos a partir da corrente de fuga, em destaque a potência dissipada, componentes resistivas e conteúdo harmônico, apresentam potencial para a identificação e o acompanhamento do processo de degradação desses dispositivos [31].

De forma complementar, diferentes trabalhos indicam que para-raios em operação estão sujeitos a solicitações elétricas e ambientais capazes de influenciar sua condição operacional ao longo do tempo. Nesse contexto, sobretensões atmosféricas, surtos de manobra, poluição, umidade e esforços térmicos podem contribuir para alterações progressivas no comportamento dos dispositivos, de maneira a afetar parâmetros empregados em estratégias de monitoramento e diagnóstico [14, 20, 49]. Relatórios do CIGRÉ [20] indicam que a exposição contínua a essas condições pode favorecer mecanismos associados ao envelhecimento.

Durante a operação dos para-raios de ZnO em campo, a corrente de fuga é considerada uma das grandezas mais utilizadas para monitorar a condição operacional desses equipamentos [5]. Nos estudos da Siemens [14], é apresentado que, dentre as componentes, a parcela resistiva da corrente de fuga apresenta maior sensibilidade às alterações associadas ao envelhecimento dos varistores. Nesse sentido, Christodoulou et al. [50] investigaram a componente resistiva da corrente de fuga dos para-raios sob diferentes condições de ensaio. Dessa forma, observaram que o aumento dessa componente pode estar associado a fatores temporários, como a presença de umidade, o aquecimento interno dos varistores e solicitações impulsivas recentes. Assim, eles ressaltam a importância de medições periódicas e de análises complementares para a obtenção de diagnósticos mais consistentes da condição operacional dos para-raios.

De maneira a aumentar a sensibilidade das análises elétricas para o monitoramento desses dispositivos frente ao envelhecimento, Zhao et al. [51] propuseram uma metodologia baseada na análise conjunta dos sinais de tensão e de corrente, utilizando técnicas de processamento de sinais para a obtenção da componente resistiva da corrente de fuga (Figura

21). Os resultados indicaram a robustez do método, mesmo na presença de componentes harmônicos e ruídos, o que o caracterizou como uma abordagem em potencial para o monitoramento do envelhecimento dos para-raios.

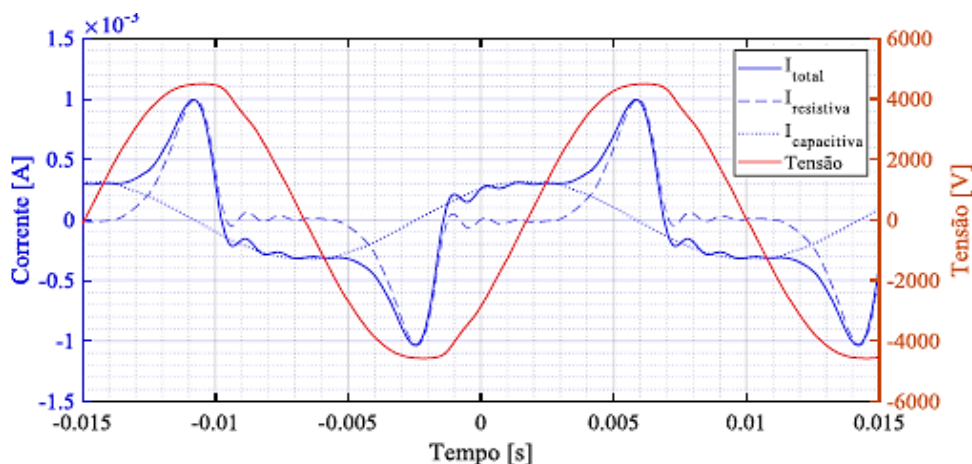


Figura 21. Decomposição de um sinal de corrente de fuga em suas componentes capacitivas e resistivas, conforme metodologia de Zhao [51], [31].

Em contrapartida, no trabalho de Lira et al. [52], os autores descrevem uma técnica de monitoramento baseada na classificação das características harmônicas da corrente de fuga total, uma vez que apresentam métodos de decomposição da corrente de fuga como abordagens que podem apresentar limitações sob determinadas condições operacionais. Posto isso, essa técnica apresentou exatidão de 98% na identificação de para-raios defeituosos e do tipo de falha associada. Desse modo, essa abordagem, a partir da análise da corrente de fuga total, é caracterizada pelos autores como uma técnica precisa e segura.

Além desse parâmetro associado à corrente de fuga, estudos também investigaram o uso de DP como ferramenta para a avaliação da condição operacional dos para-raios. Trabalhos de monitoramento e revisões técnicas indicam que a ocorrência de DP pode estar relacionada à presença de defeitos internos, à degradação de materiais isolantes e a regiões de concentração de campo elétrico [4, 5].

Todavia, diferentes autores, como Abdul-Malek et al. [25] e Nema [53], destacam que a ocorrência de DP depende das características construtivas do equipamento, das condições de operação e do mecanismo degradativo predominante. Dessa maneira, esses autores destacam que a ausência de DP não garante a ausência de degradação, assim como a sua ocorrência não implica, necessariamente, a existência de defeitos internos no equipamento, o que requer a utilização de abordagens complementares para sustentar o diagnóstico.

Desse modo, a incerteza quanto à localização da DP ou à gravidade do problema caracteriza esse método de avaliação como menos confiável do que a corrente de fuga no monitoramento da condição operacional dos para-raios [53].

Paralelamente às análises elétricas, diversas pesquisas investigaram alterações estruturais e microestruturais associadas ao processo de degradação dos varistores. Gupta [54] destaca a influência de parâmetros relacionados à composição química, à distribuição de dopantes e às características microestruturais sobre a resposta elétrica dos materiais à base de ZnO. Já Eda [55] descreve que as alterações em regiões intergranulares e em defeitos estruturais podem modificar os mecanismos de condução elétrica.

Considerando ainda as investigações no âmbito microestrutural, Nogueira [11], em 2017, avaliou os efeitos do envelhecimento artificial de varistores, a partir dos ensaios de envelhecimento realizados por Salles [32], por meio de análises microestruturais. Desse modo, os resultados permitiram identificar alterações associadas ao envelhecimento e evidenciaram a influência das condições térmicas sobre o comportamento degradativo dos dispositivos.

Em revisões mais recentes, Zacarias et al. [5] e Abdul-Malek et al. [25] observaram que diferentes mecanismos degradativos podem produzir respostas distintas nos parâmetros empregados no monitoramento, indicando limitações associadas ao uso isolado de uma única grandeza. Sendo assim, a utilização conjunta de diferentes indicadores apresenta maior potencial para diagnósticos consistentes da condição operacional dos para-raios.

A partir dos estudos apresentados, observa-se que as investigações que avaliam, de forma conjunta, diferentes parâmetros associados ao envelhecimento de para-raios submetidos a impulsos de corrente ainda são limitadas. Nesse sentido, a utilização integrada de medições de DP, de corrente de fuga e de análises microestruturais pode contribuir para uma compreensão mais ampla do processo degradativo e da sensibilidade desses indicadores ao envelhecimento desses dispositivos elétricos.

#### 4. METODOLOGIA

Com o objetivo de acompanhar o envelhecimento dos para-raios, foi desenvolvida uma metodologia de envelhecimento progressivo que permite monitorar a evolução dos principais parâmetros utilizados na avaliação de seu estado operacional.

Esta metodologia baseia-se em um processo de envelhecimento acelerado, por meio da aplicação de descargas de corrente e da evolução de parâmetros críticos.

Dessa forma, no primeiro passo, foram escolhidas 11 amostras de para-raios, com especificações elétricas iguais (Tabela 1), de três fabricantes diferentes, caracterizados como lotes 1, 2 e 3, sendo:

- 03 para o processo de envelhecimento (Am-01, Am-02 e Am-03);
- 03 para referência do ensaio de descargas parciais (DP-01, DP-02 e DP-03);
- 03 para referência do ensaio da corrente de fuga (Fuga-01, Fuga-02 e Fuga-03);
- 02 para sacrifício do ensaio de impulso atmosférico por corrente (Sacr-01 e Sacr-02).

Tabela 1. Características técnicas das amostras de para-raios.

| <b>Lotes</b> | <b>Tensão nominal (<math>U_C</math>)</b> | <b>Corrente nominal (<math>I_n</math>)</b> | <b>MCOV</b> |
|--------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------|
| 1, 2 e 3     | 15 kV                                    | 10 kA                                      | 12,75 kV    |

Esse número de amostras foi escolhido tomando-se como base a norma ABNT NBR 16050 [8], que menciona a utilização de 03 amostras completas de para-raios de cada lote, para o ensaio de envelhecimento por meio de impulso de corrente. Dessa forma, as amostras de referência também seguiram esse padrão de 03 amostras para cada ensaio, de modo a realizar a análise da corrente de fuga e de DP com as amostras sob envelhecimento. No caso das amostras de sacrifício, como não há especificação consensual por norma, optou-se por utilizar 02 amostras para calibração do sistema de ensaio.

No segundo passo, realizaram-se, como verificação inicial, os ensaios de DP e de corrente de fuga, segundo os procedimentos da norma ABNT NBR 16050 [8], em todas as onze amostras de cada fabricante. Esse processo foi importante para confirmar a integridade inicial de cada peça. Além disso, durante o ensaio de DP, também foi utilizada a antena de ultrassom para verificar possíveis sinais audíveis do fenômeno.

Para o terceiro passo, utilizou-se um procedimento próprio de ensaio de impulso de corrente, tomando-se como base a norma ABNT NBR 16050 [8], em que foram aplicados 06 impulsos de 20 kA de forma de onda 4/10  $\mu$ s nas amostras Am-01, Am-02 e Am-03 de cada fabricante. Para isso, utilizaram-se as amostras de sacrifício para calibrar o gerador de corrente antes de iniciar o ensaio.

No quarto passo, utilizando como base os resultados das amostras de referência para os ensaios de DP e de corrente de fuga, repetiram-se os ensaios do segundo e do terceiro passo nas amostras Am-01, Am-02 e Am-03 de cada fabricante até o aparecimento de sinais de DP ou de falha nesses equipamentos. Esse critério foi estabelecido por considerar que o aparecimento de sinais de DP e a ocorrência de falhas constituem evidências relevantes do avanço do processo degradativo, o que permite avaliar a sensibilidade desses parâmetros como potenciais indicadores da condição operacional dos dispositivos.

Após a finalização dos ensaios elétricos, no quinto passo, escolheu-se uma amostra envelhecida e uma amostra nova de cada fabricante para realizar os ensaios microestruturais, que foram utilizados como ferramentas complementares aos ensaios elétricos. Posteriormente, foi realizada uma comparação desses dados para avaliar as mudanças físicas e químicas do material.

No sexto passo, com base em todos os resultados dos ensaios elétricos e microestruturais, foram realizadas análises de dados para investigar o envelhecimento dos para-raios e avaliar a sensibilidade dos parâmetros monitorados como potenciais indicadores de degradação. Além disso, empregou-se a correlação de Pearson para analisar a relação entre as variáveis estudadas e identificar os parâmetros que apresentaram melhor desempenho na caracterização do envelhecimento.

Essa técnica estatística é utilizada para quantificar a intensidade e a direção de associação linear entre variáveis a partir do coeficiente de correlação  $r$ , dado pela Equação (9), cujo valor varia entre -1 e +1. Nesse sentido, valores próximos de +1 indicam forte correlação positiva entre as variáveis de avaliação, já valores próximos de -1 indicam forte correlação negativa. Para valores próximos de zero, a técnica sugere ausência de correlação significativa [56].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^l (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Em que  $x_i$  e  $y_i$  representam os valores observados das variáveis analisadas;  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as respectivas médias; e  $l$  corresponde ao número de observações consideradas [56].

Por fim, no sétimo passo, concluiu-se esta pesquisa com base nas avaliações quantitativas e qualitativas dos ensaios, a fim de verificar se os objetivos propostos foram alcançados. O fluxograma da Figura 22 ilustra a metodologia apresentada.

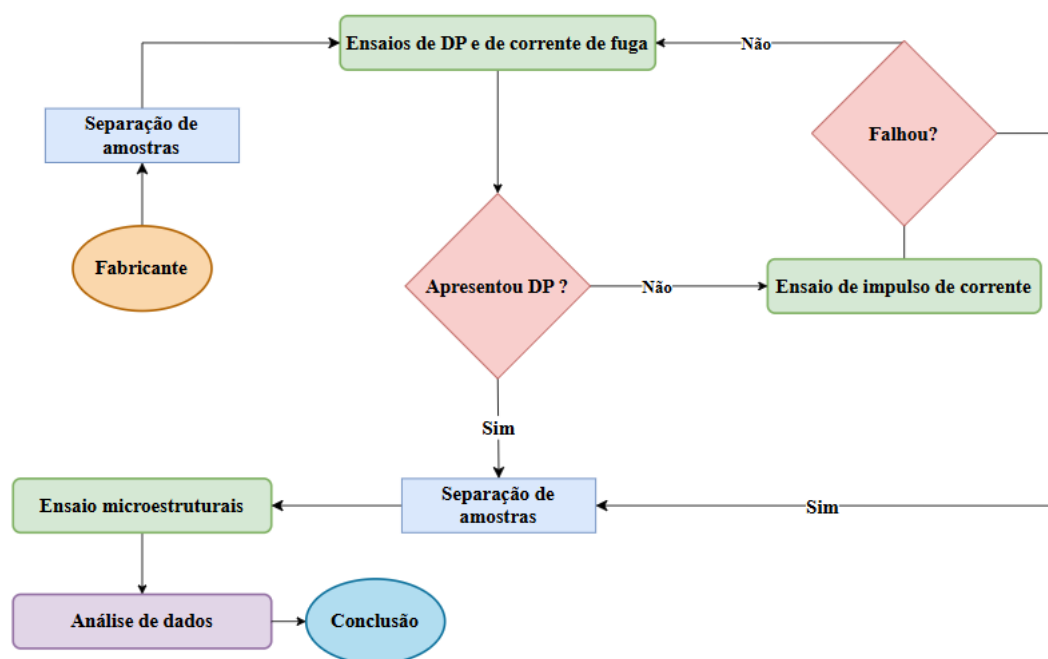


Figura 22. Fluxograma representativo da metodologia realizada.

Com base nas descrições dos procedimentos propostos neste trabalho, nas próximas subseções são exibidas as metodologias para cada ensaio realizado.

#### 4.1. Ensaios Elétricos

Os ensaios elétricos consistiram em: descargas parciais, corrente de fuga e impulso de corrente, conforme detalhado a seguir.

##### 4.1.1. Ensaio de descargas parciais

O sistema de medição de DP, baseado na ABNT NBR IEC 60270 [7], pode ser dividido em três subsistemas: dispositivo de acoplamento, sistema de transmissão e instrumento de medição. Porém, o subsistema de transmissão não é considerado no circuito, haja vista que não contribui para as características do sistema.

O dispositivo de acoplamento, parte integrante do sistema de medição e do circuito, possui um projeto específico para atingir a sensibilidade ótima requerida. Além disso, esse dispositivo é caracterizado por uma rede ativa ou passiva de quatro terminais (quadripolo), com a função de converter as correntes de entrada em sinais de tensão de saída, considerando uma frequência de resposta escolhida que não comprometa a taxa de distorção harmônica do objeto sob teste. Desse modo, os sinais de saída são transmitidos por um sistema de transmissão ao equipamento de medição.

Em nota, dada a constância do espectro de amplitude de frequência dos pulsos de entrada no intervalo da largura de banda ( $\Delta f$ ) do sistema de medição, a resposta do equipamento é um pulso de tensão unipolar proporcional à carga de entrada. Ademais, a duração e o valor de piso do pulso de saída são determinados pela impedância de transferência  $Z(f)$  do sistema de medição.

A partir dessas informações, o instrumento de medição pode ser representado por três tipos de caracterização: banda larga, banda larga com integrador e banda estreita. O sistema de medição de DP em banda larga caracteriza-se pela combinação entre o dispositivo de acoplamento e o instrumento de medição em banda larga. A partir disso, esse sistema é representado por  $Z(f)$ , com valores fixos dos limites inferior e superior de frequência  $f_1$  e  $f_2$ , para um tempo de resolução de pulso entre 5  $\mu s$  e 20  $\mu s$ , conforme apresentado na Tabela 2.

Já os instrumentos de medição de DP de banda larga com integrador ativo são determinados, de acordo com a norma ABNT NBR IEC 60270 [7], por um amplificador de banda muito larga e por um integrador eletrônico caracterizado pela constante de tempo de sua rede integradora capacitiva e resistiva. Dessa forma, um sinal de tensão, amplificado com o aumento da carga e com resolução de pulso consecutivo inferior a 10  $\mu s$ , caracteriza a resposta desse equipamento ao pulso de DP. Como observação, pode-se calcular um limite superior de frequência para esse instrumento a partir da constante de tempo, determinada pela relação entre o amplificador e o integrador ativo. Nesse sentido, os intervalos de frequência desse equipamento não foram tabelados por norma.

Por fim, os instrumentos de largura estreita são definidos pela norma por um pequeno  $\Delta f$  e uma frequência central ( $f_m$ ), a qual pode ser variada entre uma faixa de frequência determinada, considerando uma amplitude constante do espectro do pulso de corrente DP e um tempo de resolução do pulso consecutivo superior a 80  $\mu s$  [7]. A Tabela 2 apresenta a faixa de frequência desse instrumento de medição.

Tabela 2. Faixa de frequência para instrumentos de medição conforme a ABNT NBR IEC 60270 [7].

| Instrumento           | Parâmetro  | Faixa recomendada       |
|-----------------------|------------|-------------------------|
| <b>Banda larga</b>    | $f_1$      | Entre 30 kHz e 100 kHz  |
|                       | $f_2$      | Menor que 1 MHz         |
|                       | $\Delta f$ | Entre 100 kHz e 900 kHz |
| <b>Banda estreita</b> | $f_m$      | Entre 50 kHz e 1 MHz    |
|                       | $\Delta f$ | Entre 9 kHz e 30 kHz    |

Para a medição das DP, utiliza-se o circuito convencional de acoplamento em série, segundo a ABNT NBR IEC 60270 [7], conforme exemplificado na Figura 23.

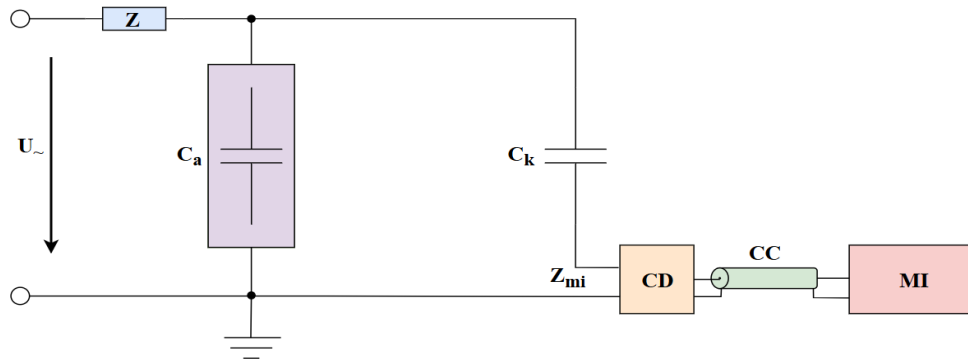


Figura 23. Circuito de acoplamento em série para mensuração de DP. Adaptado de [7].

Em que:

- $U_{\sim}$  corresponde à fonte de tensão;
- $C_a$  refere-se à capacitância do objeto em teste;
- $C_k$  refere-se ao capacitor de acoplamento;
- $Z_{mi}$  refere-se à impedância de medição;
- $CD$  corresponde ao quadripolo;
- $CC$  corresponde aos cabos de conexão;
- $MI$  corresponde ao instrumento de medição;
- $Z$  refere-se ao filtro de alta tensão (AT).

Para garantir que o sistema de medição possa medir corretamente a intensidade da DP, utiliza-se a calibração do sistema. Assim, é possível determinar o fator de escala ( $k$ ) para a medição da carga aparente (em pC), considerado o parâmetro mais importante na medição de DP.

Posto isso, é imprescindível realizar a calibração de cada novo objeto em ensaio, visto que a capacitância  $C_a$  desse objeto pode influenciar as características do circuito. Por outro lado, em uma gama de objetos similares, não é necessário realizar a calibração a cada troca do objeto sob teste, desde que a capacitância  $C_a$  esteja dentro de  $\pm 10\%$  dos valores médios.

Desse modo, a calibração é realizada através da injeção de pulsos de corrente de 60 ns, com carga  $q_0$  e parâmetros conhecidos nos terminais do objeto sob teste. Nesse sentido, o pulso produz um degrau de tensão ( $U_0$ ) em série com o capacitor ( $C_0$ ), de modo que a magnitude dos pulsos injetados no sistema é dada pela Equação (10). Em nota, é importante que o calibrador esteja em conformidade, de maneira a não influenciar a amplitude da carga aparente nem distorcer a medição [7].

$$q_0 = U_0 \cdot C_0 \quad (10)$$

Cada tipo de defeito de DP tem um padrão e um comportamento específicos. Desse modo, é importante utilizar outros parâmetros para identificar corretamente o tipo de DP. O Padrão de Descargas Parciais em Resolução de Fase, do inglês *Phase-Resolved Partial Discharge (PRPD)*, proposto no final da década de 1970, é um parâmetro utilizado para avaliar as DP do sistema.

Além disso, o PRPD é o método mais popular e eficiente para a interpretação de sinais de DP, uma vez que ele mostra as quantidades relevantes de DP. Assim, as informações exibidas por meio desse método são: o sinal de DP medido por magnitude de pulso, ângulo de fase e densidade numérica [38]. A Figura 24 ilustra um exemplo de PRPD em um para-raios de tensão nominal de 192 kV submetido a uma tensão de ensaio de 60 kV, que representa 45,2% da tensão de operação desse dispositivo de proteção, indicando sinais de falha de DP no equipamento [57].

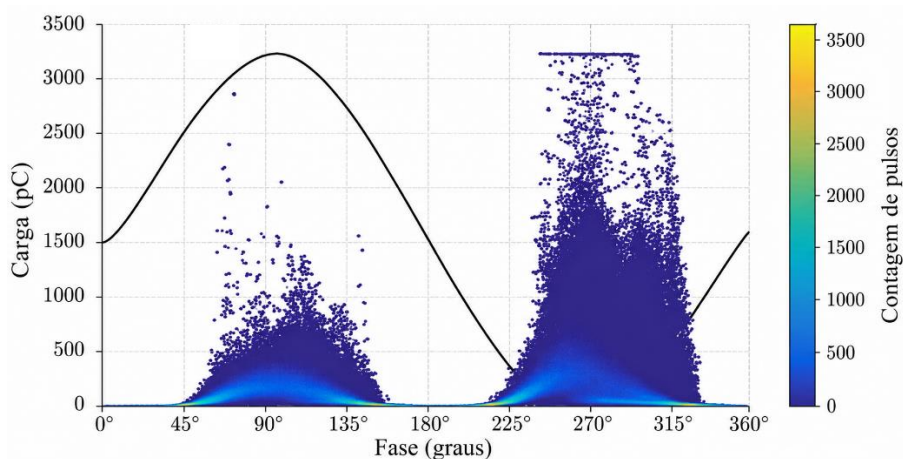


Figura 24. PRPD em um para-raio de 192 kV, indicando sinais de DP. Adaptado de [57].

#### 4.1.1.1. Procedimentos para medição de descargas parciais em para-raios em laboratório

Para este teste, utilizou-se a cela de ensaio do LAT-EFEI, exibida na Figura 25. Esse circuito vai ao encontro da norma ABNT NBR IEC 60270 [7], conforme exibido na Figura 23.

Os equipamentos utilizados são listados a seguir:

- A. Fonte de alimentação;
- B. Variador de tensão;
- C. Filtro;
- D. Capacitor de acoplamento;
- E. Impedância de medição;
- F. Objeto sob ensaio (para-raios de distribuição).

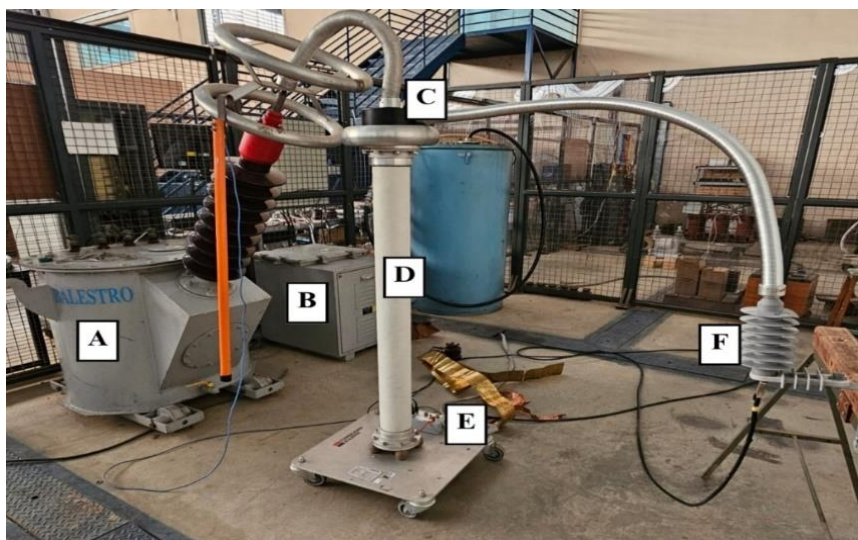


Figura 25. Cella de ensaio de DP.

Conforme a Figura 26, também se utilizaram o calibrador da Haefely (G), o painel de controle (H) e o detector de descargas parciais DDX 9121b (I). Este último caracteriza-se por se comunicar com um *software* próprio, de modo a exibir as simulações resultantes e permitir o controle remoto. Além disso, o detector mostra-se sensível ao captar sinais de DP, visto que possui ajuste de banda de frequência e de *gating* (janelas), permitindo medições sem interferências estáticas e com menor ruído [58].

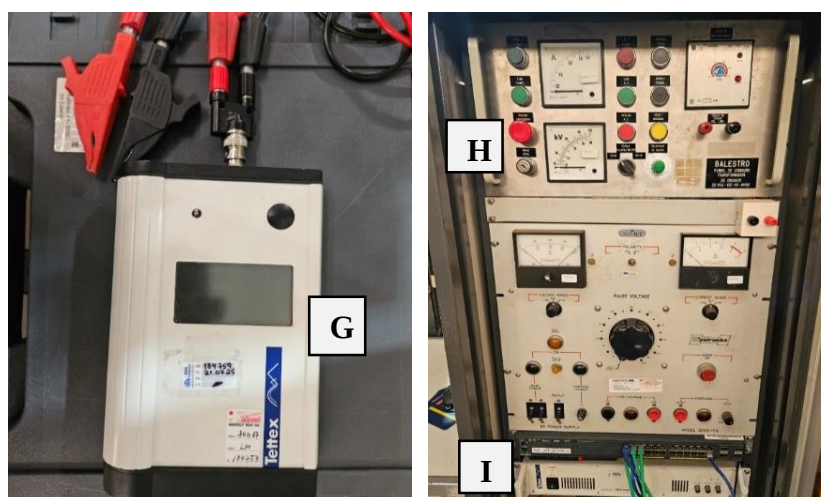


Figura 26. Calibrador (G), painel de controle (H) e detector de descargas parciais (I).

Posto isso, as amostras de referência DP-01, DP-02 e DP-03 foram ensaiadas antes das amostras de envelhecimento Am-01, Am-02 e Am-03, em todos os ensaios de descargas parciais realizados, até que a última peça de cada lote apresentasse DP ou falha final. Esse procedimento foi realizado a fim de verificar o sistema de medição e, posteriormente, compará-lo aos resultados das amostras em processo de envelhecimento.

De acordo com a ABNT NBR 16050 [8], para a realização do ensaio, a tensão de frequência industrial deve ser elevada até a tensão nominal ( $V_n$ ) dos para-raios, mantida por 2 s a 10 s e, posteriormente, reduzida para 1,05 pu da MCOV do dispositivo de proteção, conforme a Figura 27. Para que o para-raios esteja apto a operar, a DP não deve exceder 10 pC [8, 59]. Assim, de 2 s a 10 s, a amostra foi submetida à tensão nominal de 15 kV; posteriormente a esse período de exploração, a uma tensão próxima de 13,4 kV (1,05 pu x MCOV).

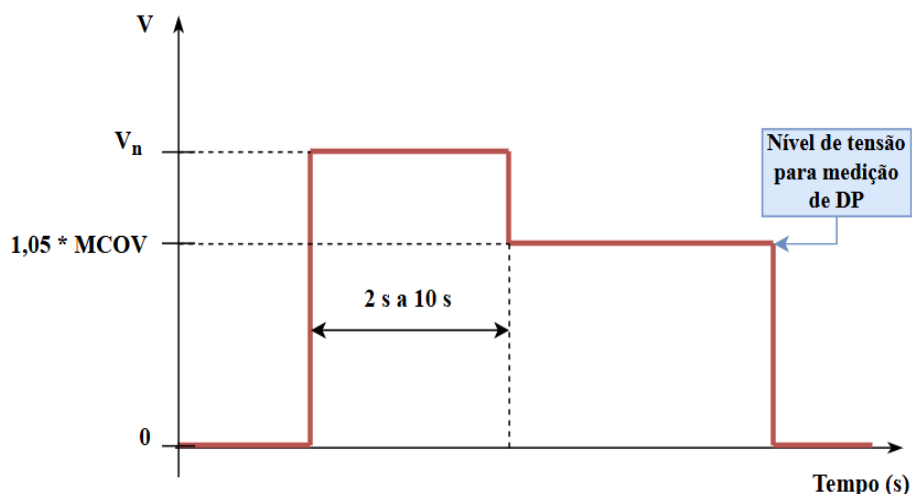


Figura 27. Ensaio de descargas parciais em para-raios.

Os valores de tensão foram aplicados manualmente por meio do painel de controle da bancada de ensaio de DP. Nesse sentido, utilizava-se o controle remoto, a partir do *software* do detector de DP, para verificar a presença do fenômeno mediante o valor de tensão aplicado.

Após a finalização do ensaio, o *software* apresentava o relatório completo, no qual constavam os valores de carga na amostra, os valores de tensão aplicada no sistema, o tempo de ensaio e os gráficos PRPD. Assim, esses dados eram utilizados como estudo do envelhecimento dos para-raios por meio da análise das DP.

#### 4.1.1.2. Procedimentos para medição de descargas parciais em para-raios em campo

Uma das técnicas utilizadas para a medição de DP nas redes de distribuição é o método de detecção ultrassônica [60], caracterizado por captar ondas sonoras com frequência superior a 20 kHz, que está acima do limite da percepção humana (16,5 kHz). No SEP, as fontes de ultrassom detectáveis são descargas parciais, arcos elétricos, trilhamentos e corona [61].

Nessa técnica, a antena de ultrassom é apontada na direção do objeto sob análise em DP, em campo, a uma distância de até 25 m, a fim de verificar a intensidade do sinal audível [60].

Apesar de esse método ser caracterizado por ser menos invasivo, simples e seguro de executar, pode apresentar problemas de medição devido à interferência externa. Assim, seus

resultados muitas vezes precisam ser verificados por outros equipamentos, como termovisores, para confirmar a presença de fontes ultrassônicas, como as DP [60, 61, 62].

Neste trabalho também foi utilizada a antena de ultrassom da *Radar Engineers* (Figura 28), modelo 250, como auxiliar na detecção das DP por meio de ondas de ultrassom. Esse equipamento é composto por um sensor ultrassônico, um refletor parabólico e um receptor [63].



Figura 28. Detector de ultrassom: modelo 250.

Para o correto manuseio desse equipamento, é necessário mirá-lo na direção do objeto sob ensaio, de modo a observar sinais e sons audíveis, caso haja DP. Assim, para esta pesquisa, durante o ensaio de DP pelo método elétrico, a antena foi direcionada à amostra de para-raios, conforme exibido na Figura 29.

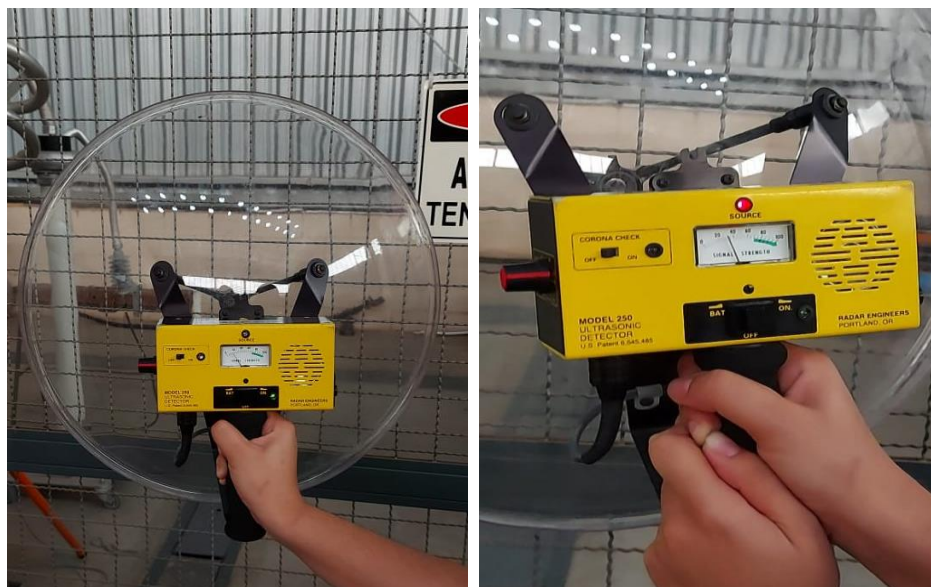


Figura 29. Manuseio do detector de ultrassom.

Apesar de a antena não permitir quantificar os níveis de DP, apresenta-se como auxiliar do ensaio elétrico, de forma a indicar a origem das DP e a fonte de corona que possa interferir nos resultados de ensaio.

#### 4.1.2. Ensaio de corrente de fuga

Os para-raios a ZnO em operação, mesmo sob a tensão nominal, apresentam uma corrente de fuga total que os percorre em direção à malha de terra. Ela pode ser dividida em duas componentes principais: capacitiva linear e resistiva não linear. Na ocorrência de degradação, a componente resistiva e a perda de potência ativa aumentam concomitantemente conforme o estado do para-raios, o que pode, como consequência, resultar em explosões, em queimas ou na inoperabilidade do equipamento [28].

De modo a ilustrar a forma de onda da corrente de fuga total de um varistor a ZnO, a Figura 30 exibe uma medição típica realizada em laboratório. Nela, nota-se a forma de onda de  $U_C$ , que corresponde à tensão de operação contínua a que o varistor foi submetido. Considerando a mensuração simultânea de tensão e corrente, quando a tensão atinge o valor máximo (a derivada da tensão em relação ao tempo é igual a zero), a amplitude da corrente capacitiva é nula e o valor instantâneo da corrente de fuga passa a ser o valor de pico da componente resistiva [64].

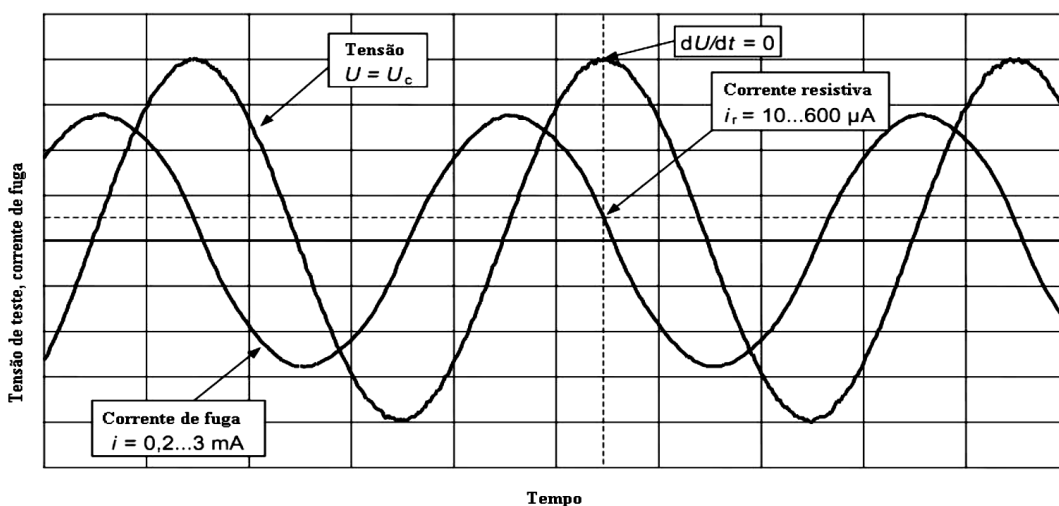


Figura 30. Medição da corrente de fuga total em laboratório ao longo do tempo. Adaptado de [64].

Posto isso, para este ensaio em laboratório, a norma ABNT NBR 16050 [8] prescreve que a medição deve ser executada na tensão de frequência industrial e na temperatura ambiente, entre 5 °C e 40 °C.

Considerando a não-linearidade dos varistores, é possível observar o aparecimento de componentes harmônicas a partir da componente resistiva da corrente de fuga, mesmo em

tensão senoidal. Nesse sentido, a corrente de fuga total apresenta distorções harmônicas devido à soma das componentes resistiva e capacitiva, com maior influência da componente resistiva e correlação com a tensão e a temperatura [28].

Em condições normais de operação, a componente de terceira harmônica situa-se entre 10% e 40% da corrente resistiva. Todavia, em condições de degradação dos para-raios, é possível identificar o aumento da corrente resistiva e, conseqüentemente, o aumento das componentes harmônicas, o que contribui para os estudos do estado dos para-raios [64].

Para o diagnóstico do dispositivo, realiza-se a medição da terceira harmônica da corrente de fuga total [28]. Em alguns trabalhos, já é possível verificar a presença de sinais na faixa que abrange até o nono harmônico em varistores degradados por sobretensão e por impulso de corrente [31, 65, 66].

Na medição do conteúdo harmônico, considerando sinais contínuos no tempo, pode-se utilizar diretamente a transformada de Fourier, sem a necessidade de tensão de referência, uma vez que se assume a origem das harmônicas exclusivamente pela componente resistiva, sem distorções na tensão do sistema. Assim, o valor da terceira harmônica medida é um indicativo da componente resistiva, que pode ser influenciada pela tensão e pela temperatura. Embora esse método seja simples, pode apresentar erros por desconsiderar a compensação de harmônicos na rede para a medição [28].

Nesse sentido, foi utilizada nesta pesquisa a transformada rápida de Fourier (do inglês, *Fast Fourier Transform – FFT*), que é aplicada a sinais discretos, como aplicação da Transformada Discreta de Fourier (do inglês, *Discrete Fourier Transform – DFT*), de modo a obter o espectro de frequência dos sinais de corrente de fuga total, com base na pesquisa de Nogueira [31].

Esse método também pode apresentar divergências na análise dos resultados devido a possíveis estimativas difusas dos componentes harmônicos, o que implica o desenvolvimento de novas técnicas de medição dos harmônicos da corrente de fuga [67, 52]. Todavia, a FFT, para múltiplos inteiros da frequência do sinal, é considerada adequada para obtenção das componentes harmônicas de um sinal, dado que apresenta resultados coerentes e compatíveis com outros métodos, conforme ilustrado no trabalho de Nogueira [31].

#### 4.1.2.1. Procedimentos para medição da corrente de fuga

Para este ensaio de corrente de fuga, o LAT-EFEI utiliza como base o circuito ilustrado na Figura 31.

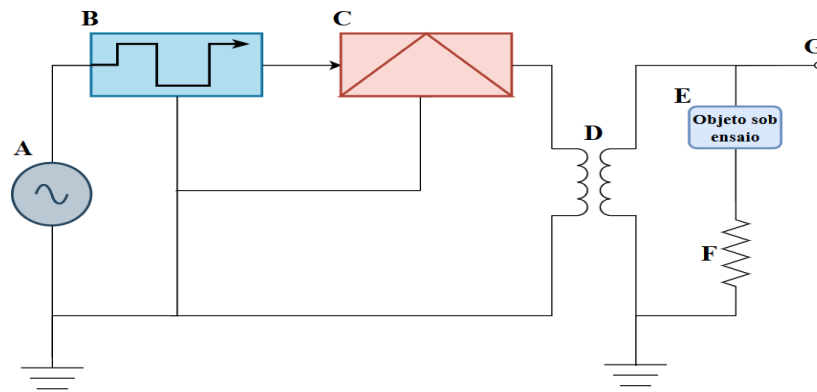


Figura 31. Circuito para ensaio de medição da corrente de fuga. Adaptado de [31].

Em que:

- A. Fonte de tensão em corrente alternada;
- B. Gerador de funções;
- C. Amplificador de potência;
- D. Transformador de potencial;
- E. Objeto sob ensaio;
- F. Resistor *shunt* de 1 k $\Omega$  para leitura da corrente de fuga conectado ao osciloscópio;
- G. Ponta de prova de AT conectada ao osciloscópio supramencionado.

Para que o sinal de tensão aplicado não apresentasse distorções harmônicas, utilizou-se um gerador de funções com fator de forma igual a 1,0.

Desse modo, a cela de ensaio do LAT-EFEI, caracterizada por executar esse ensaio, é exibida na Figura 32.

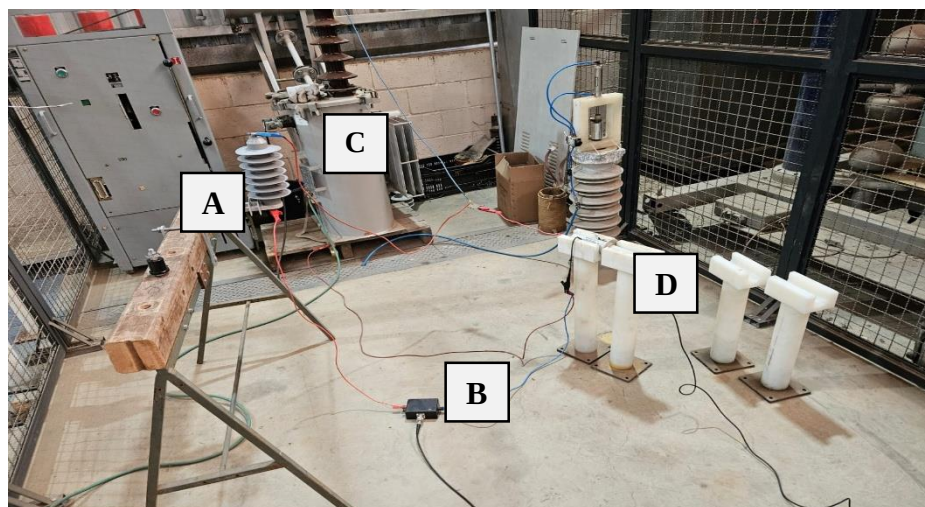


Figura 32. Cella de ensaio de corrente de fuga. Objeto sob teste (A), resistor *shunt* (B), transformador de potencial (C) e ponta de alta tensão (D).

Na Figura 33 é possível observar o amplificador, o osciloscópio e o gerador de funções utilizados no ensaio.

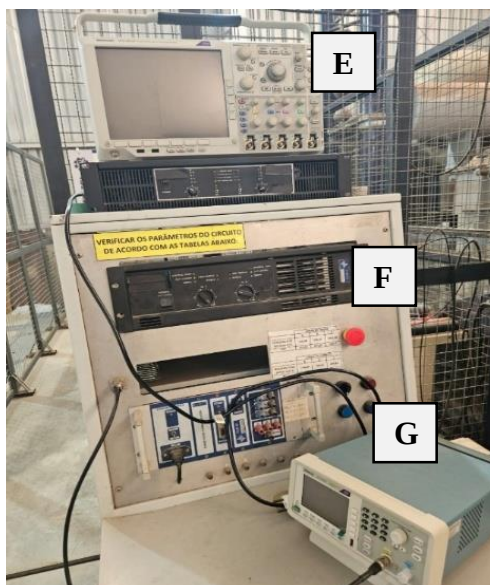


Figura 33. Cella de ensaio de corrente de fuga. Osciloscópio Tektronix (E), amplificador (F) e gerador de funções (G).

Considerando-se como base a norma ABNT NBR IEC 16050 [8] para a execução do ensaio de corrente de fuga, determinou-se como referência fixa o pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga em 1 mA da amostra ensaiada, a fim de obter os registros oscilográficos de corrente de fuga total e de tensão aplicada.

Assim, para a determinação da componente resistiva da corrente de fuga nesse ponto de operação, utilizou-se o valor instantâneo correspondente ao pico positivo da tensão aplicada. Dessa maneira, a corrente de referência foi mantida em aproximadamente 1 mA ao longo dos ensaios, enquanto a tensão correspondente a esse valor era monitorada durante o processo de envelhecimento.

As amostras de referência (Fuga-01, Fuga-02 e Fuga-03), que não foram submetidas ao ensaio de envelhecimento, foram utilizadas exclusivamente para acompanhar a estabilidade das medições e servir de base de comparação para as amostras Am-01, Am-02 e Am-03 de cada lote. Como observação, não foi aplicado fator de correção aos resultados obtidos.

Durante os ensaios, a avaliação baseou-se principalmente na observação do aumento do pico negativo da corrente de fuga total, uma vez que esse parâmetro é frequentemente utilizado como indicador preliminar de alterações no sistema de isolamento. Dessa forma, os resultados serviram como ferramenta auxiliar para a identificação de possíveis indícios de degradação, especialmente em amostras que não apresentaram sinais de DP.

Com os resultados obtidos por meio do osciloscópio, e tomando-se como base o trabalho de Nogueira [31], foi gerado um arquivo .csv em cada ensaio, de modo a realizar o tratamento da corrente de fuga total no OCTAVE, a fim de avaliar o processo de envelhecimento da amostra.

Para isso, conforme descrito no subtópico 4.1.2, a corrente de fuga apresenta duas componentes principais: a resistiva, associada às perdas do material não linear, e a capacitiva, proveniente da capacitância dos blocos e da estrutura dos para-raios. Nesse sentido, de maneira a separar essas duas componentes, foi aplicado o método proposto por ZHAO et al. [51].

O método considera um modelo equivalente constituído por uma capacitância  $C_S$  associada ao comportamento capacitivo dos blocos e um ramo não linear, de modo a representar a parcela resistiva. A corrente total pode ser descrita pela Equação (11):

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t) \quad (11)$$

Em que  $i(t)$  corresponde à corrente total,  $i_C(t)$  à componente capacitiva e  $i_R(t)$  à componente resistiva.

A componente resistiva é dada pela Equação (12):

$$i_R(t) = i(t) - C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (12)$$

Considerando-se que  $C$  é a capacitância equivalente do ramo capacitivo associada ao para-raio.

Já a tensão no ramo resistivo pode ser expressa pela equação (13):

$$u_R(t) = u_t(t) - \frac{1}{C_S} \cdot \int i_R(t) dt \quad (13)$$

Em que  $C_S$  é a capacitância série presente no circuito equivalente utilizado pelo método de ZHAO et al. [51], que representa os efeitos associados ao comportamento elétrico global do para-raios.

Substituindo a Equação (11) na Equação (13), tem-se a seguinte Equação (14):

$$u_R(t) = \left(1 + \frac{C}{C_S}\right) \cdot u_t(t) - \frac{1}{C_S} \cdot \int i(t) dt \quad (14)$$

O método considera que a corrente resistiva  $i_R(t)$  e a tensão resistiva  $u_R(t)$  devem permanecer em fase e atingirem simultaneamente seus valores máximos no instante  $t_m$  em que suas derivadas são nulas.

Os sinais de tensão e de corrente também podem ser representados por séries de Fourier, conforme as Equações (15) e (16):

$$u(t) = \sum_{h=0}^{\infty} [a_h \cdot \cos(k\omega t) + b_h \cdot \sin(k\omega t)] \quad (15)$$

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} [p_h \cdot \cos(k\omega t) + q_h \cdot \sin(k\omega t)] \quad (16)$$

Em que  $a_h$ ,  $b_h$ ,  $p_h$  e  $q_h$  representam os coeficientes harmônicos dos sinais.

No código implementado neste trabalho, foi incorporada a FFT, como ferramenta auxiliar para a obtenção dos coeficientes fundamentais e a extração do conteúdo harmônico dos sinais. Diferentemente do método original de ZHAO et al. [51], a FFT foi utilizada para tornar mais eficientes a análise espectral e a extração dos parâmetros necessários às etapas posteriores do processamento.

A partir do coeficiente fundamental ( $h = 1$ ), são estimados os parâmetros  $C$  e  $C_s$  iniciais, utilizados na decomposição preliminar dos sinais, conforme as Equações (17) e (18).

$$C_0 = \frac{b_1 p_1 - a_1 q_1}{\omega(a_1^2 + b_1^2)} \quad (17)$$

$$C_s = \frac{p_1^2 + q_1^2 + 2\omega C(a_1 q_1 - b_1 p_1) + \omega^2 C^2(a_1^2 + b_1^2)}{\omega[(b_1 p_1 - a_1 q_1) - \omega C(a_1^2 + b_1^2)]} \quad (18)$$

Em seguida, realiza-se uma etapa iterativa de otimização baseada na correlação cruzada entre a tensão resistiva e a corrente resistiva, conforme a Equação (19):

$$r_{u_R i_R} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) \cdot i_R(t + \tau) dt \quad (19)$$

Essa correlação cruzada é utilizada para verificar a defasagem entre os sinais reconstruídos. Caso seja identificada diferença de fase, o valor de  $C$  é atualizado iterativamente (n) por meio da Equação (20).

$$C^{(n+1)} = C^{(n)} - \frac{C^{(0)}}{100000} \quad (20)$$

Nesse sentido, o processo iterativo continua até que o deslocamento temporal entre os sinais seja minimizado, a correlação se estabilize ou o número máximo de iterações do algoritmo seja atingido.

Após a convergência do método, são obtidas as componentes resistiva e capacitiva da corrente de fuga. A partir desses componentes, são extraídos os parâmetros utilizados na análise do envelhecimento, como valor eficaz (do inglês, *Root Mean Square* - RMS), picos resistivos, componentes harmônicas ímpares até a 9ª ordem, distorção harmônica total (do inglês, *Total Harmonic Distortion* - THD), polaridade e potência dissipada.

- **Valor eficaz (RMS):** foi obtido conforme a Equação (21) para representar a magnitude dos sinais de corrente de fuga total ( $I_{RMS_{total}}$ ), componentes resistiva ( $I_{RMS_R}$ ) e capacitiva ( $I_{RMS_C}$ ) da corrente de fuga.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2} \quad (21)$$

Em que  $N$  representa o número de amostras e  $x_k$  corresponde ao valor instantâneo do sinal.

- **Harmônicos:** as amplitudes harmônicas foram obtidas a partir dos componentes espectrais após a aplicação da FFT, com base na Equação (22).

$$H_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (22)$$

Dado que  $h$ , neste trabalho, assume os valores de 1, 3, 5, 7 e 9.

- **Distorção Harmônica Total (THD):** esse parâmetro foi usado para quantificar a contribuição das componentes harmônicas em relação à componente fundamental. Para a componente resistiva, o THD é dado pela Equação (23).

$$THD_R = \frac{\sqrt{H_3^2 + H_5^2 + H_7^2 + H_9^2}}{H_1} \quad (23)$$

Essa mesma equação foi utilizada para determinar a distorção harmônica da corrente total.

- **Polaridade:** esse parâmetro foi utilizado por apresentar sensibilidade às alterações na forma de onda da corrente ao longo do processo de degradação dos para-raios. Nesse

sentido, a Equação (24) apresenta o cálculo da polaridade utilizado no algoritmo, para complementar a análise do comportamento elétrico das amostras.

$$Pol = \frac{|I_{p+}|}{|I_{p-}|} \quad (24)$$

Em que  $Pol$  corresponde à polaridade,  $|I_{p+}|$  ao valor absoluto do pico positivo e  $|I_{p-}|$  é o valor absoluto do pico negativo da corrente de fuga total.

Para comparação entre a polaridade inicial e final, utiliza-se a Equação (25):

$$\Delta Pol(\%) = \frac{Pol_f - Pol_i}{Pol_i} \times 100 \quad (25)$$

Dado que  $Pol_i$  corresponde à polaridade inicial e  $Pol_f$  à polaridade final da componente resistiva.

- **Potência:** como o envelhecimento influencia principalmente a componente resistiva da corrente de fuga, utilizou-se esse parâmetro de potência de forma a complementar a análise. Assim, as Equações (26) e (27) exibem o cálculo da potência utilizado no algoritmo.

$$p_R(t) = u_R(t) \cdot i_R(t) \quad (26)$$

A potência média resistiva é dada por:

$$P_R(t) = \frac{1}{k} \cdot \sum_{k=1}^k u_{Rk} \cdot i_{Rk} \quad (27)$$

De forma a facilitar o entendimento do código criado, a Figura 34 ilustra o fluxograma associado.

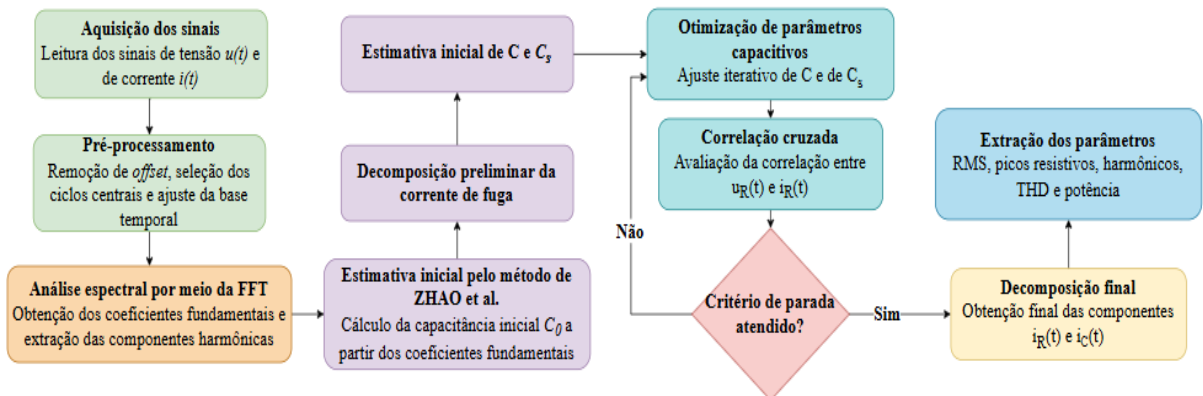


Figura 34. Fluxograma do algoritmo para análise da corrente de fuga.

#### 4.1.3. Ensaio de impulso de corrente

Com base na pesquisa de [11], os impulsos atmosféricos são identificados por uma forma de onda com tempo de subida curto, a qual varia entre um microsegundo e dezenas de microsegundos, e com tempo de cauda que pode variar entre dezenas e centenas de microsegundos.

A norma IEC 60060-1 [68] prescreve que a forma dos impulsos padrão é dada por um tempo de frente de  $1,2 \mu\text{s}$  e um tempo de cauda de  $50 \mu\text{s}$ , conforme ilustrada na Figura 35, visto que esse padrão assemelha-se remotamente aos raios [69].

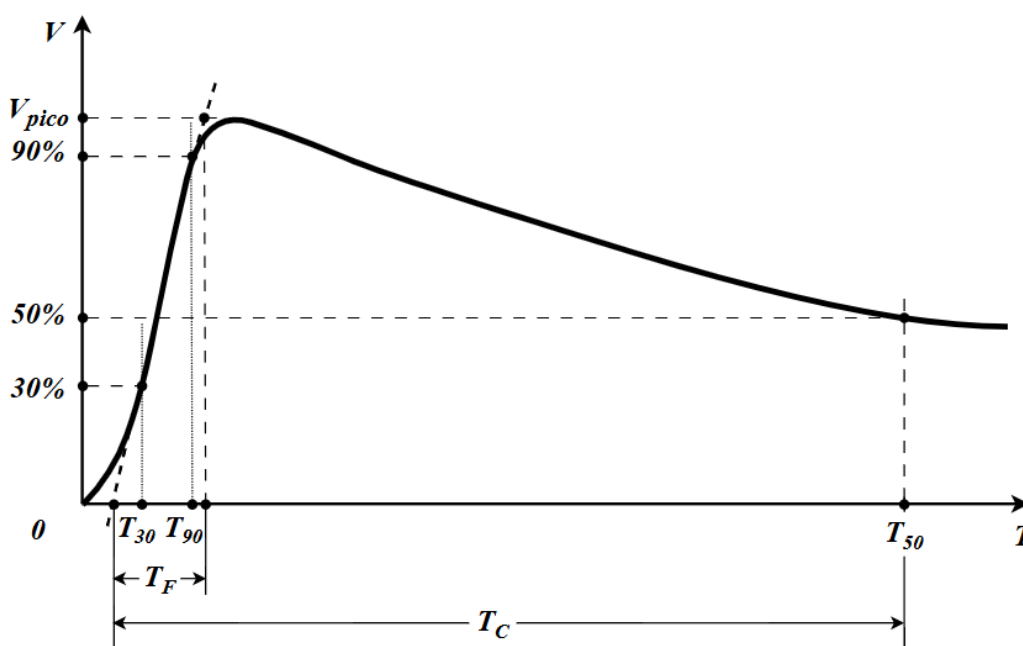


Figura 35. Forma de onda padrão de tensão de um impulso atmosférico. Adaptado de [68].

Em que:

- $T_{30}$  refere-se ao instante pelo qual a tensão atinge 30% de seu valor de pico durante a rampa de subida;
- $T_{90}$  representa o instante pelo qual a tensão atinge 90% de seu valor de pico durante a rampa de subida;
- $T_{50}$  refere-se ao instante pelo qual a tensão atinge 50% de seu valor de pico durante a rampa de descida;
- $T_F$  representa o tempo de frente, dado por  $1,67 \cdot (T_{90} - T_{30}) = 1,2 \mu\text{s}$ ;
- $T_C$  refere-se ao tempo de cauda, medido a partir do momento em que a tensão atinge 50% de seu valor de pico na cauda [68].

Ao ser submetido a uma descarga atmosférica com as características informadas acima, a corrente que escoar pelo para-raios apresenta uma forma de onda semelhante à exibida na Figura 36.

Essa forma de onda é padronizada por norma, de modo a ser reproduzida em laboratório. Assim, os impulsos de correntes padrão possuem a forma  $(T_F/T_C)$  na razão de  $4/10 \mu s$  ou  $8/20 \mu s$  [59].

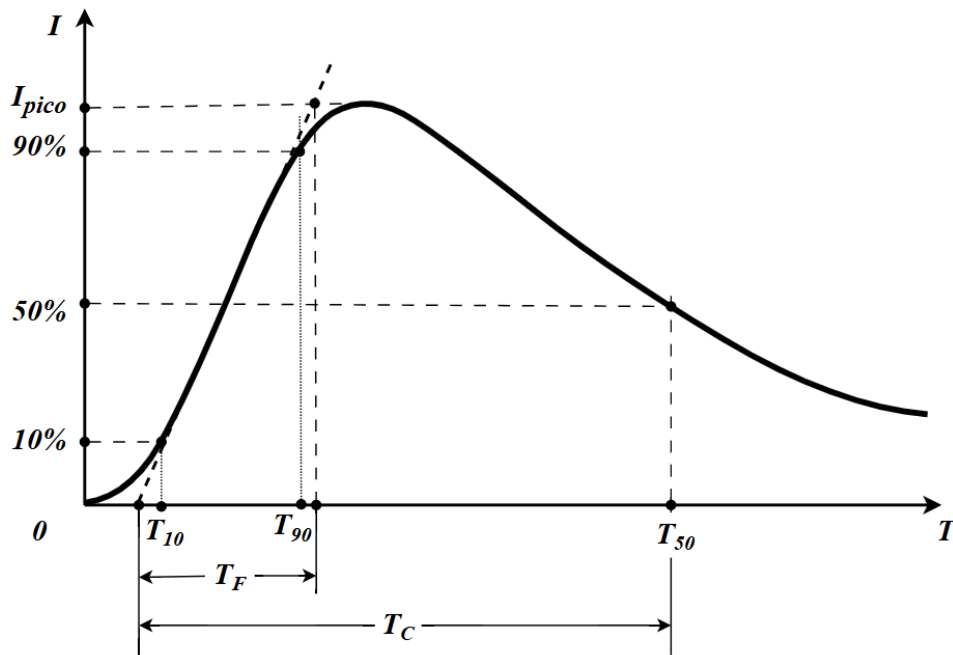


Figura 36. Forma de onda de corrente padrão decorrente de um impulso atmosférico. Adaptado de [70].

Dado que,

- $T_{10}$  refere-se ao instante pelo qual a tensão atinge 10% de seu valor de pico durante a rampa de subida;
- $T_{90}$  representa o instante pelo qual a tensão atinge 90% de seu valor de pico durante a rampa de subida;
- $T_{50}$  refere-se ao instante pelo qual a tensão atinge 50% de seu valor de pico durante a rampa de descida;
- $T_F$  representa o tempo de frente, dado por  $1,25 \cdot (T_{90} - T_{10})$ ;
- $T_C$  refere-se ao tempo de cauda, medido a partir do momento em que a corrente atinge, na cauda, 50% de seu valor de pico a partir do início virtual [11, 70].

#### 4.1.3.1. Procedimentos para o ensaio de impulso atmosférico

Com base na norma ABNT NBR IEC 16050 [8], utilizou-se um procedimento próprio para o envelhecimento das amostras Am-01, Am-02 e Am-03. Dessa forma, elas foram

submetidas individualmente a seis impulsos de corrente, com valor de pico correspondente ao dobro da corrente nominal dos para-raios (20 kA), na forma de onda 4/10  $\mu$ s, após a calibração do sistema com amostras de sacrifício. A quantidade de impulsos foi definida a partir de ensaios preliminares, nos quais se verificou que esse número era suficiente para provocar alterações mensuráveis nos para-raios sem causar falha imediata dos dispositivos.

Essa forma de onda foi escolhida com base no trabalho de Nogueira [31], visto que os resultados de envelhecimento a partir da corrente de fuga foram mais evidentes em comparação às demais formas de onda. Durante as aplicações, os resultados das formas de onda da corrente e da tensão residual foram armazenados em arquivos .csv para posterior tratamento e análise no OCTAVE.

Caso uma das amostras do lote apresentasse falha por explosão sem o aparecimento prévio de sinais de DP, nas demais amostras eram aplicados de um a dois impulsos por vez, a fim de aumentar a resolução do acompanhamento experimental e evitar a perda de possíveis indícios associados ao surgimento de DP antes da falha.

Após essas aplicações, as amostras eram deixadas em repouso para resfriar até a temperatura ambiente.

Com as amostras resfriadas, elas eram avaliadas pelos ensaios de DP e de corrente de fuga, a fim de verificar o aparecimento de DP e o processo de envelhecimento, respectivamente. Caso alguma amostra apresentasse DP, esta era separada para as análises posteriores.

Todavia, se alguma amostra apresentasse trincas, fissuras, quebras ou explosões no momento da descarga de corrente, o ensaio para esse corpo de prova era finalizado e separado para análises físico-químicas.

Assim, enquanto as amostras não apresentassem sinais de DP ou falhas, elas eram submetidas a esse ciclo de ensaios

A Figura 37 exibe o circuito utilizado no LAT-EFEI para aplicação do ensaio de impulso de corrente.

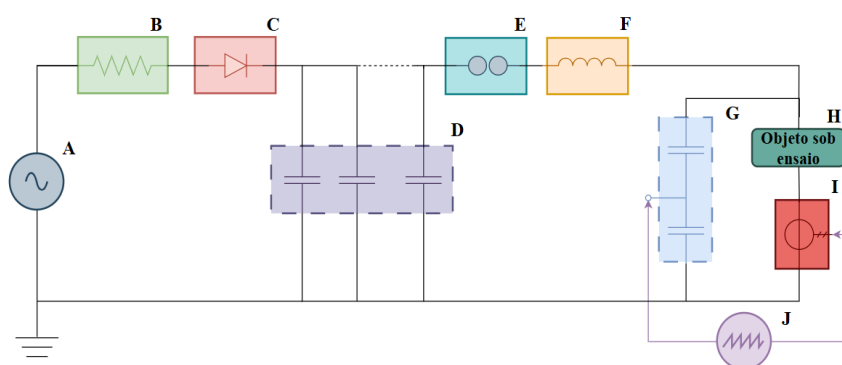


Figura 37. Circuito para ensaio de impulso de corrente. Adaptado de [31].

Em que,

- A. Fonte de tensão em corrente alternada;
- B. Resistor limitador de corrente;
- C. Diodo retificador;
- D. Banco de capacitores;
- E. Centelhador;
- F. Indutor limitador de duração do impulso atmosférico;
- G. Divisor de tensão capacitivo;
- H. Objeto sob ensaio;
- I. Transformador de corrente (TC);
- J. Osciloscópio.

O funcionamento desse sistema, para a aplicação de impulsos de forma de onda  $4/10\ \mu\text{s}$ , consiste em aplicar um valor de tensão por meio da fonte de tensão, de maneira a carregar o banco de capacitores através do diodo retificador e do resistor limitador de corrente.

Nesse sentido, a partir do momento em que se atinge a tensão estimada nos capacitores, o diodo é aberto e a fonte é desligada do banco de capacitores. Por meio do centelhador, toda a carga nos capacitores é descarregada sobre a amostra sob ensaio [31]. A Figura 38 exibe a cela de ensaio do impulso de corrente no LAT-EFEI.



Figura 38. Cella de ensaio de impulso de corrente. Resistor limitador de corrente (A), fonte de tensão AC (B), diodo retificador (C), divisor capacitivo (D) e banco de capacitores (E).

Além disso, o indutor limitador é utilizado para diminuir a duração do impulso, e o osciloscópio mede a corrente obtida no impulso por meio do transformador de corrente (TC) e

a tensão residual, coletada a partir do divisor de tensão capacitivo. A Figura 39 exibe os demais equipamentos da cela, utilizados para a execução do ensaio.

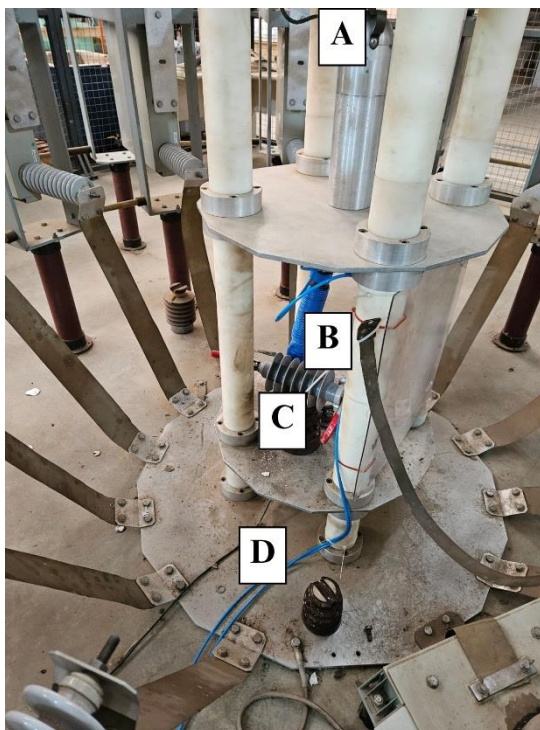


Figura 39. Cella de ensaio de impulso de corrente. Gap (A), indutor limitador (B), objeto sob ensaio (C) e TC de alta frequência (D).

#### 4.2. Ensaios Microestruturais

A partir do final da década de 1970, após o desenvolvimento de pesquisas sobre as propriedades não lineares do ZnO, foram identificados trabalhos sobre a degradação e o envelhecimento de varistores dos para-raios a ZnO [71, 72].

Tomando-se como base os estudos de [73], nos quais foi avaliada a relação dos varistores a ZnO submetidos a DP externa, durante o processo de envelhecimento, foram observados produtos de decomposição resultantes, como o oxigênio (O) e o nitrogênio (N), que na presença de descargas parciais podem gerar compostos responsáveis pela degradação do sistema de isolamento desses dispositivos, como o ácido nítrico (NO). Essa degradação foi caracterizada pelo aumento da condutividade superficial, da temperatura e da corrente de fuga.

Contudo, em [11] é descrito que esses estudos não analisam os efeitos das mudanças microestruturais dos dispositivos de supressão, apenas avaliam o comportamento dos parâmetros elétricos frente ao envelhecimento dos para-raios. Outrossim, em muitos trabalhos, quando há uma avaliação físico-química, o foco consiste na sinterização de novos varistores [74, 75].

Dessa forma, esta pesquisa, além de apresentar avaliações de degradação de para-raios a ZnO para o estudo elétrico das DP, também faz um estudo do comportamento microestrutural desses dispositivos, a fim de coletar dados físico-químicos e correlacioná-los com os resultados elétricos.

Nesse sentido, para os ensaios microestruturais, foram utilizados varistores (Figura 40) de uma amostra envelhecida e de uma amostra nova de para-raios de cada fabricante, de modo a realizar a comparação físico-química e investigar o envelhecimento dos para-raios.



Figura 40. Varistores de ZnO de amostras de para-raios.

Nesse sentido, as amostras foram preparadas de maneira a obter resultados satisfatórios em todas as etapas do ensaio. Assim, para os testes de análise termogravimétrica (TGA) e de calorimetria exploratória diferencial (DSC), realizados no LAT-EFEI, parte das amostras foi fragmentada, de modo que as frações do varistor fossem próximas ao tamanho de grãos de areia, conforme a Figura 41.



Figura 41. Fragmentos do varistor para ensaios de TGA e DSC.

Para os demais testes microestruturais, realizados nos laboratórios de Metalurgia e Materiais (LMM) e de Caracterização Estrutural (LCE) da UNIFEI, foram retiradas lascas de até 2,0 cm das amostras de varistores por meio de impacto, de modo que essas não fossem expostas à contaminação. Esses processos foram necessários para que as amostras fossem compatíveis com os equipamentos de análise físico-química e para manter a integridade da

análise. A Figura 42 ilustra os fragmentos de varistores retirados para os ensaios microestruturais.



Figura 42. Lascas do varistor para análises físico-químicas.

A partir desse procedimento inicial, as amostras foram preparadas conforme as seguintes etapas [11]:

- I. Embutimento: para facilitar o manuseio das amostras, foi realizado o embutimento do fragmento em baquelite a uma pressão de  $200 \text{ kg/cm}^2$  de maneira a manter exposta a superfície a ser estudada. Nessa etapa, utilizou-se a embutidora da Arotec, modelo PRE 30, conforme exibida na Figura 43 (A).
- II. Lixamento: a fim de deixar a superfície da amostra mais lisa para a análise microestrutural do material da componente varistora, utilizou-se a lixadeira Arotec, modelo Aropol 2V (Figura 43 (B)). Nesse equipamento, foram usadas lixas circulares, cujas espessuras variavam entre as mais grossas (nº 200), as médias (nº 600) e as mais finas (nº 800), conforme a necessidade do acabamento superficial da amostra.
- III. Polimento: para garantir que a superfície do fragmento estivesse lisa o suficiente para análise em microscópio ótico, utilizou-se uma politriz circular da Teclago, modelo PL01 para o polimento das amostras, como exibida na Figura 43 (C).

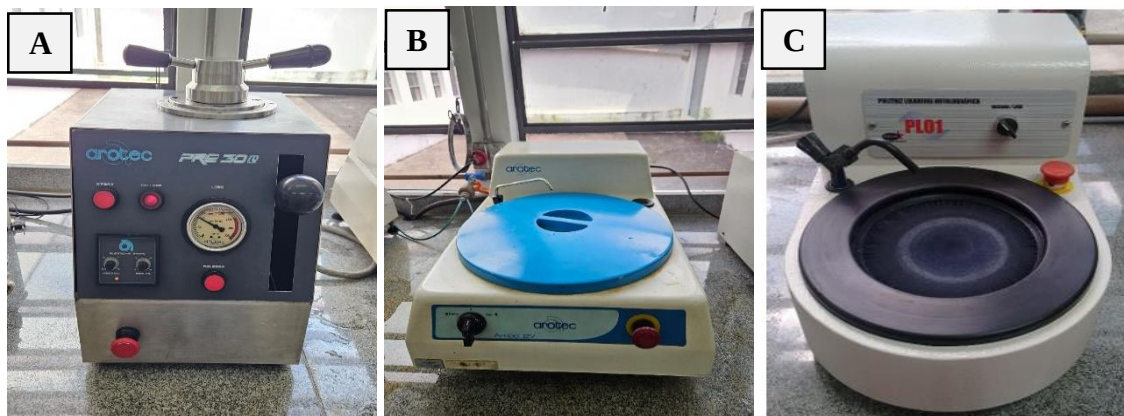


Figura 43. Equipamento para o preparo das amostras. Ebutidora (A), lixadeira (B) e politriz (C).

Durante esse processo foram utilizados detergente e alumina em suspensão para o melhor acabamento das amostras. A Figura 44 ilustra uma amostra do varistor novo e uma do varistor envelhecido após a finalização da preparação dos fragmentos para ensaio.



Figura 44. Amostras preparadas para ensaios microestruturais.

#### 4.2.1. Ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma técnica de análise térmica utilizada para estudo de transições térmicas e reações nos materiais. Além disso, esse método mensura o calor liberado ou absorvido por um material em função da temperatura ou do tempo [76].

Dessa forma, a DSC fornece informações qualitativas e quantitativas sobre mudanças na capacidade térmica e sobre mudanças físicas e químicas de processos endotérmicos e exotérmicos, como temperaturas de transição, capacidade do calor específico, ponto de fusão, ponto de vaporização, calor de polimerização, calor de cristalização e calor de reação [76, 77]. A Figura 45 ilustra uma DSC de pó composto de ZnO, o qual é utilizado para a preparação de varistores.

Na imagem é possível identificar quatro picos endotérmicos e três exotérmicos, respectivamente, nas temperaturas: 81 °C, 152 °C, 210 °C, 245 °C, 136 °C, 187 °C e 295 °C. De acordo com [78], esses picos referem-se à evaporação da água e à decomposição de hidróxidos, dado que óxidos metálicos como o ZnO possuem temperatura de fusão de 1975 °C. Além disso, não foram observadas mudanças estruturais no ZnO até 500 °C nem defeitos extrínsecos. Todavia, identificaram-se defeitos intrínsecos nas nanopartículas de ZnO, considerando-se os três picos endotérmicos, que se referem ao desaparecimento dos hidróxidos.

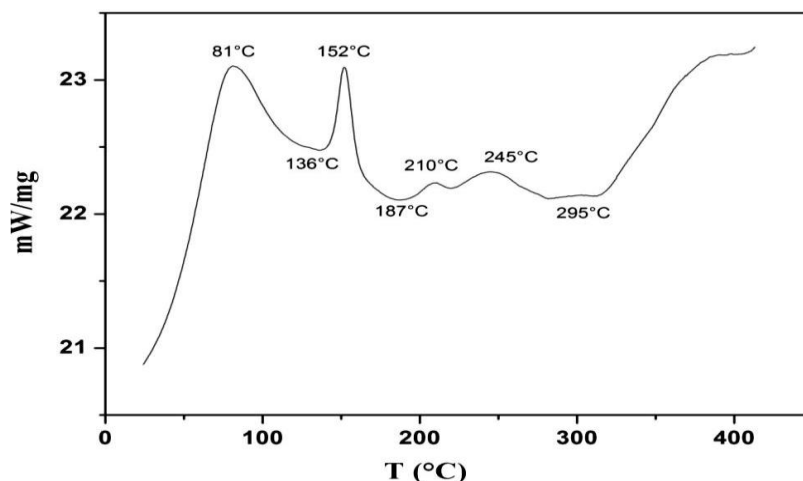


Figura 45. DSC em nanopartículas de ZnO [78].

Para os ensaios de DSC desta pesquisa, utilizaram-se cerca de 40 mg de cada amostra fragmentada de varistor (Figura 41) para serem analisados em um calorímetro da Shimadzu, modelo DSC 60 Plus (Figura 46) do laboratório de química do LAT-EFEI.



Figura 46. Calorímetro para análise de DSC das amostras.

As amostras novas e envelhecidas foram aquecidas de 25 °C a 600 °C, a uma taxa de aquecimento de aproximadamente 10 °C/min, em atmosfera de nitrogênio.

#### 4.2.2. Ensaio de caracterização termogravimétrica (TGA)

Essa técnica é utilizada para a identificação da estrutura macroconstituente e a análise qualitativa de materiais inorgânicos, metais, polímeros, plásticos, cerâmicas, vidros e materiais compósitos, em uma faixa de temperatura de 25 °C a 1600 °C. Nesse sentido, a análise termogravimétrica (TGA), frequentemente utilizada em conjunto com a DSC, mensura a

variação de massa do material sob teste em função do aumento da temperatura, fornecendo informações sobre o percentual composicional e o envelhecimento da amostra [79, 80].

Além disso, esse método pode ser utilizado para o estudo da perda de massa do material, ocasionada por oxidação, decomposição ou perdas de voláteis, como a umidade, em determinada faixa fixa de temperatura, resultando em um gráfico de temperatura *versus* massa (ou porcentagem de peso) [81]. Abaixo, é exibido na Figura 47 o gráfico de TGA de uma amostra de ZnO puro como exemplificação dessa técnica.

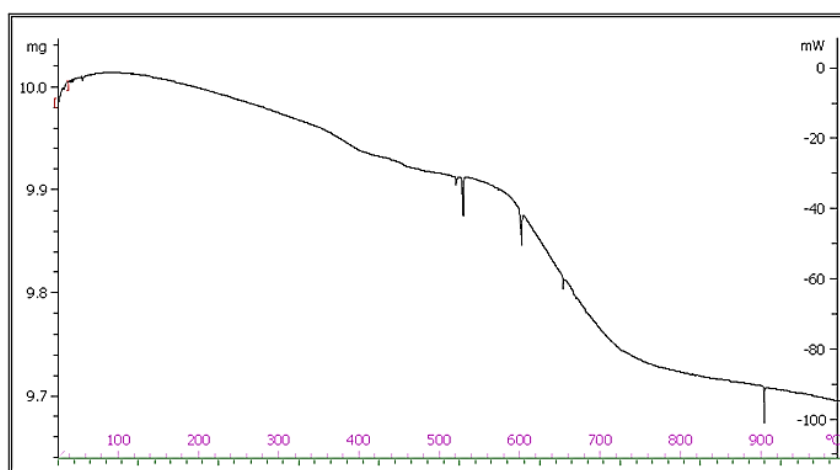


Figura 47. TGA em ZnO puro. Adaptado de [82].

Na Figura 47, entre 500 °C e 750 °C, observa-se perda de massa do material de aproximadamente 9,900 mg para 9,750 mg, conforme evidenciado pela acentuação da curva nessa faixa de temperatura [82].

Para os ensaios de TGA deste trabalho, as amostras foram submetidas a um analisador termogravimétrico da Shimadzu, modelo TG 50 (Figura 48) do laboratório de química do LAT-EFEI.

Nesse sentido, as amostras novas e envelhecidas (Figura 41) foram analisadas sob uma velocidade controlada de aquecimento de 10 °C/min, e a variação de massa foi monitorada em função da temperatura, de 25 °C a 1000 °C.



Figura 48. Analisador termogravimétrico para análise de TGA das amostras.

#### 4.2.3. Ensaio de microscopia ótica de reflexão (MOR)

Essa técnica é realizada em objetos opacos à luz visível, como ocorre em varistores de para-raios a ZnO, para analisar a ocorrência de falhas ou defeitos na microestrutura desses materiais. Dessa forma, utiliza-se uma luz externa, acoplada ou não ao microscópio, para que apenas a superfície do material seja observada. Assim, por meio de um conjunto de lentes, forma-se a imagem resultante da reflexão da luz, ampliada, da superfície em estudo [11].

A Figura 49 exibe duas microscopias óticas da superfície de varistores a ZnO com ampliação de 100 vezes, de modo a verificar o contorno dos grãos das amostras. Em (a), é possível verificar que o varistor novo não possui nenhum tipo de defeito, haja vista que os grãos estão completos e alinhados. Já em (b), nota-se uma perfuração causada pelo aquecimento por efeito Joule após a aplicação de impulsos a 80 °C em laboratório.

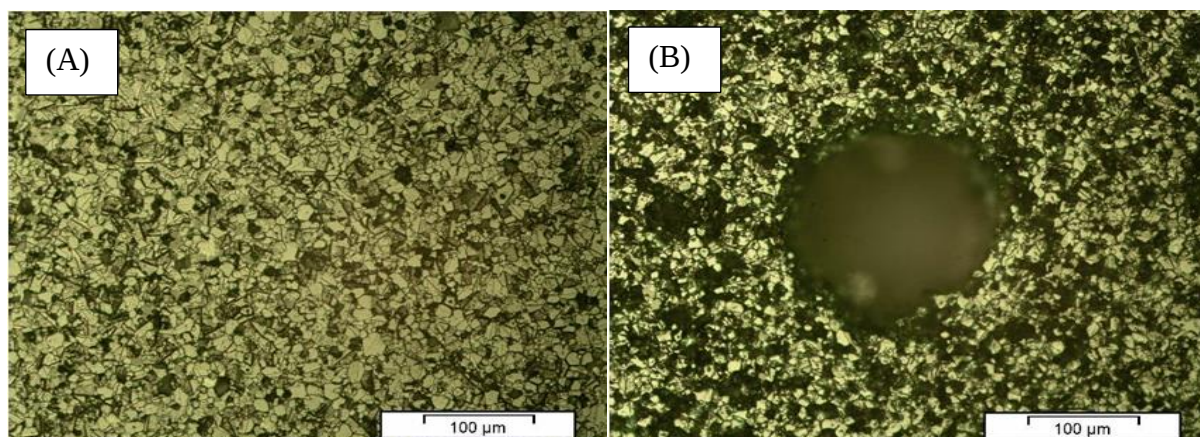


Figura 49. Microscopias óticas em varistores a ZnO. Amostra nova em (a); e amostra envelhecida com impulsos atmosféricos a 80 °C em (b). Adaptado de [11].

Para esta pesquisa, após a finalização da preparação dos fragmentos de varistores em baquelite, as amostras (Figura 44) foram submetidas a MOR no LMM da UNIFEI, a fim de observar o contorno dos grãos, possíveis trincas, vazios ou trilhamentos provocados por DP entre as amostras.

Para o ensaio, utilizou-se um microscópio ótico da Zeiss, modelo Jenavert, equipado com câmera digital acoplada e analisador de imagem (*Image Analyzer PRO-PLUS*), conforme exibido na Figura 50. As imagens capturadas das amostras foram ampliadas com lentes de 100x, 200x e 500x, a fim de analisar a microestrutura em diferentes níveis de detalhamento.



Figura 50. Microscópio ótico para análise microscópica das amostras.

#### 4.2.4. Ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é caracterizada por permitir a análise de materiais orgânicos e inorgânicos heterogêneos em escala manométrica (nm) e micrométrica ( $\mu\text{m}$ ), considerando uma ampliação de até 300 mil vezes. Ademais, essa técnica também obtém imagens tridimensionais da superfície de diversos materiais. O método consiste em irradiar uma área, ou microvolume, a ser examinada com um feixe de elétrons. Parte desse feixe reflete na forma de raios X e fótons de outras energias, e parte na forma de elétrons retroespalhados (de regiões profundas da amostra) e de elétrons secundários (de regiões superficiais da amostra), que são coletados por um detector e exibidos em uma tela catódica, de modo a formar imagens topográficas, cristalográficas e composicionais da amostra estudada [11, 83].

Dessa forma, a MEV pode ser utilizada para estudar as características macro e micro dos varistores, além de analisar a micromorfologia de seu sistema de isolamento em diferentes

estados [84]. A Figura 51 exibe a técnica em para-raios a ZnO, por meio da imagem lateral da camada de isolamento, considerando o varistor sem envelhecimento, com defeito e após uma explosão.

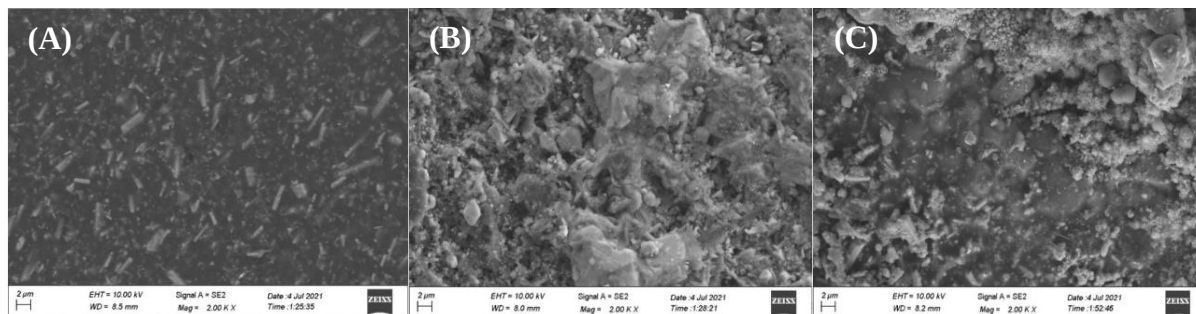


Figura 51. MEV em varistores de ZnO: sem envelhecimento (a), defeituoso (b) e após uma explosão (c). Adaptado de [84].

Já a espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) é considerada uma técnica microanalítica avançada, que fornece informações semiquantitativas e semiquantitativas sobre a superfície da amostra, permitindo a análise elementar e a determinação da composição química [85].

De acordo com Mardira et al. [86], o detector de EDS possui um feixe de energia entre 10 keV e 20 keV e uma eficiência superior a 95%, permitindo que as alturas relativas dos picos observados nas linhas de raios X sejam próximas dos valores esperados para o sinal emitido pelas amostras. Com esses resultados, é possível comparar a intensidade qualitativa de elementos já conhecidos e obter uma razão entre eles. Dessa forma, essa razão é utilizada para identificar a composição das amostras.

A Figura 52 ilustra o resultado de EDS em para-raios, considerando as situações antes e após a degradação acelerada por campos elétricos em CA e por esforço térmico. Posto isso, observa-se que após a degradação da amostra, a composição do varistor apresentava maiores concentrações de Bi no contorno do grão, característicos do processo de envelhecimento [66].

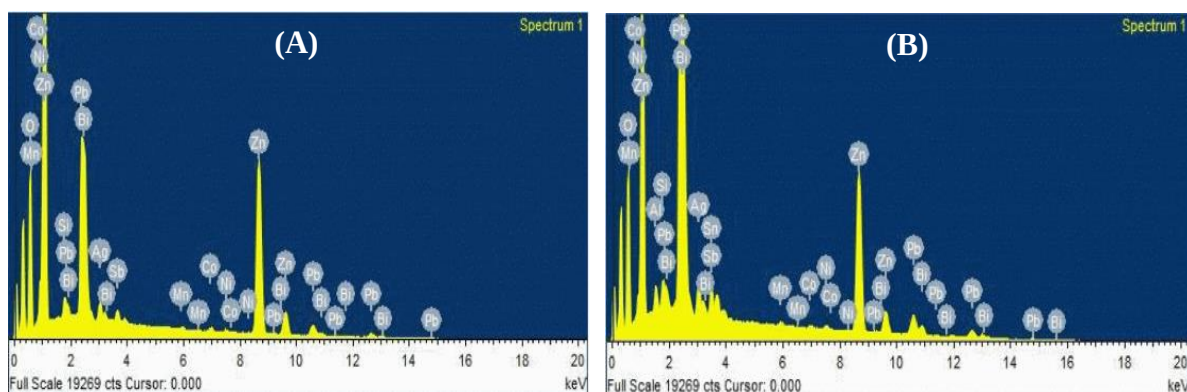


Figura 52. EDS em varistores a ZnO. Amostra antes da degradação em (a); e amostra após a degradação em (b). Adaptado de [87].

Nesta pesquisa, de modo a estudar a fractografia das amostras (Figura 44), realizou-se a análise por MEV, utilizando-se detectores de elétrons secundários (SE) e EDS. Na MEV, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura da Zeiss, modelo EVO MA15, do LCE da UNIFEI, conforme exibido na Figura 53.



Figura 53. Microscópio eletrônico de varredura com espectrômetro acoplado para análise por MEV e EDS.

Para quantificar e analisar as composições químicas das fases presentes nas amostras varistoras, realizou-se a EDS por meio de um espectrômetro da Bruker modelo XFlash 6|10, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura, como mostrado na Figura 53.

#### 4.2.5. Ensaio de difratometria de raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X (DRX) é utilizada para investigar a estrutura molecular do material em teste. O método consiste em registrar os padrões de DRX de referência e compará-los aos padrões obtidos na amostra analisada, a fim de identificar o tipo de substância presente no material. Para isso, a análise de DRX é feita por espalhamento de raios-X por meio de átomos de Cobre (Cu) sem alteração do comprimento de onda [86].

Na Figura 54, é possível verificar o uso da DRX em varistores de ZnO em duas situações: sem envelhecimento e após envelhecimento por impulsos atmosféricos nas condições de 20 °C, 60 °C e 80 °C. Como resultado, observam-se as seguintes estruturas cristalinas nos varistores: ZnO (●); óxido de bismuto –  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (▼); antimonato de zinco –  $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$  (◆); trióxido de antimônio –  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  (○); antimoniato de zinco e bismuto (pirocloro) –  $\text{Zn}_2\text{Bi}_3\text{Sb}_3\text{O}_{14}$  (■); e antimonito de cobalto –  $\text{CoSb}_2\text{O}_4$  (⊞). Como observação, próximo ao ângulo de 22°, o pirocloro se forma durante o resfriamento do material após a descarga atmosférica [11].

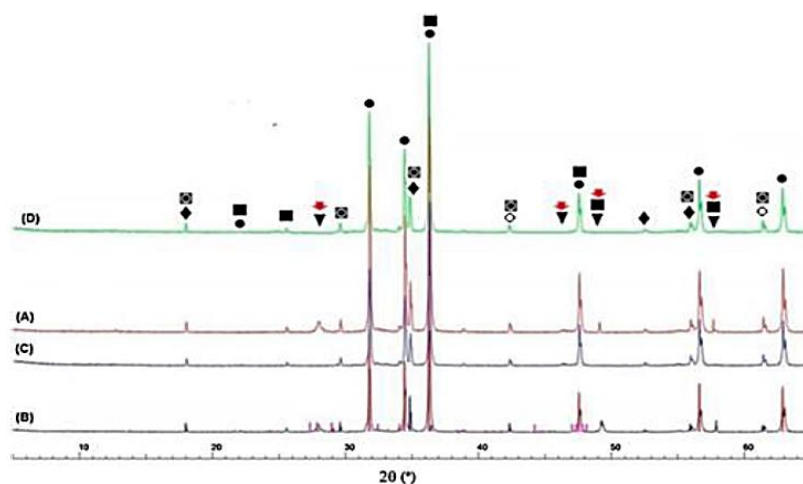


Figura 54. DRX em varistor a ZnO antes do envelhecimento (C) e após os impulsos de 20 °C (A), 60 °C (B) e 80 °C (D) [11].

De forma a estudar os compostos cristalinos presentes nas amostras (Figura 44) desta pesquisa, realizou-se a DRX por meio de um difratômetro da Panalytical, modelo X'Pert Pro (Figura 55) no LCE da UNIFEI.



Figura 55. Difratômetro para análise das estruturas cristalinas das amostras.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas inicialmente as análises realizadas a partir dos ensaios de impulsos de corrente nas amostras Am-01, Am-02 e Am-03 de cada lote, de modo a exibir a quantidade de impulsos suportados, bem como as formas de onda inicial e final de cada peça.

Em seguida, são apresentados os resultados da corrente de fuga ao longo do processo de envelhecimento das amostras. Nesse contexto, também são analisados os resultados relativos às distorções harmônicas, aos picos negativos da componente resistiva da corrente de fuga, à polaridade e à potência dissipada pelas amostras.

Além disso, são apresentadas as medições iniciais e finais da descarga parcial de cada peça, a fim de avaliar a sensibilidade desse parâmetro ao processo de envelhecimento.

Como investigações complementares acerca da degradação das amostras de para-raios, também são apresentados os resultados dos ensaios microestruturais, que auxiliam na identificação de possíveis alterações estruturais e na interpretação dos resultados elétricos.

Por fim, finaliza-se o capítulo por meio dos resultados apresentados pela técnica de correlação de Pearson, de maneira a avaliar qual parâmetro é mais sensível para a análise de envelhecimento dos para-raios.

### 5.1. Resultados dos Ensaios de Impulsos de Corrente

Como ponto de partida para a análise dos resultados, a Figura 56 apresenta as formas de onda de corrente de 4/10  $\mu$ s e de tensão obtidas no primeiro impulso aplicado a uma amostra nova. Esse registro permite caracterizar o impulso de corrente aplicado e a resposta inicial dos para-raios antes do avanço do processo de envelhecimento.

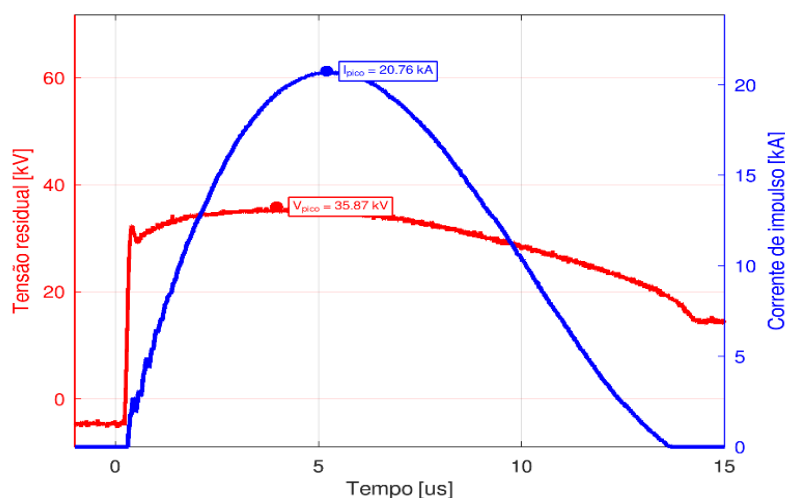


Figura 56. Resultado do impulso de corrente, com duração de 4/10  $\mu$ s, em uma amostra nova.

Embora as amostras usadas no estudo de envelhecimento acelerado de para-raios possuam as mesmas características técnicas, cada uma obteve um número diferente de impulsos máximos suportados até o aparecimento de DP (amostras em \*) ou até sua falha por explosão, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Número de impulsos de corrente de 20 kA suportados por cada peça.

| N° | Lote 1 |        |        | Lote 2 |       |       | Lote 3 |       |       |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|    | Am-01  | Am-02* | Am-03* | Am-01  | Am-02 | Am-03 | Am-01* | Am-02 | Am-03 |
|    | 105    | 112    | 37     | 36     | 21    | 28    | 40     | 2     | 24    |

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3, observa-se que as amostras apresentaram comportamentos distintos diante das sucessivas aplicações de impulsos. Como exemplo representativo desse comportamento, a Figura 57 apresenta a forma de onda do último impulso aplicado à amostra Am-03 do Lote 2, que resultou na falha por explosão da peça.

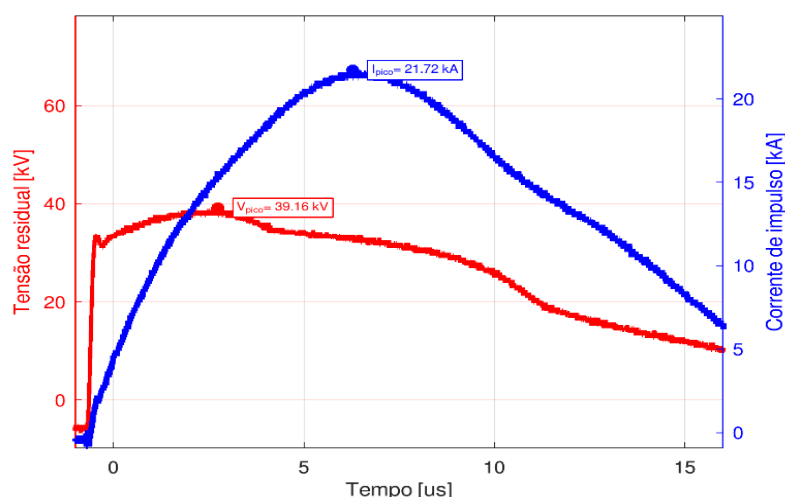


Figura 57. Último resultado do impulso de corrente, com duração de 4/10  $\mu$ s, da amostra Am-03 do Lote 2.

Para uma análise mais detalhada dos resultados, os lotes são discutidos individualmente. No Lote 1, Am-01 apresentou falha por explosão no último impulso aplicado. Em contrapartida, as amostras Am-02 e Am-03 apresentaram formas de onda finais semelhantes às observadas nas condições iniciais de ensaio. Entretanto, análises posteriores dos parâmetros elétricos evidenciaram a presença de sinais de DP nessas amostras.

Nesse contexto, com o objetivo de investigar o comportamento de uma amostra que apresentou sinais de DP sem falha imediata, a Am-03 foi selecionada para a aplicação de um impulso adicional após a identificação desses sinais. Durante esse teste, a amostra apresentou falha por explosão, conforme exibida na Figura 58.

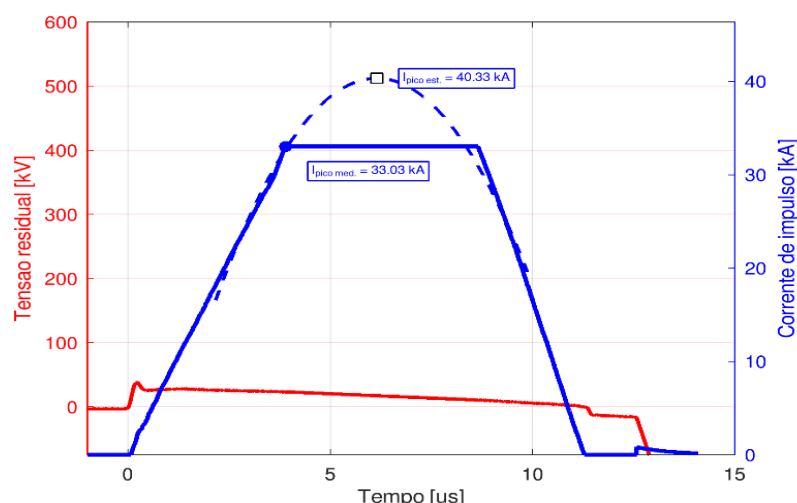


Figura 58. Resultado do impulso de corrente adicional com duração de 4/10  $\mu$ s da amostra Am-03 do Lote 1.

Para o Lote 2, observou-se que todas as amostras apresentaram falha por explosão durante os ensaios de envelhecimento, o que permitiu evidenciar a degradação progressiva dos para-raios frente às sucessivas aplicações de impulsos de corrente, conforme exemplificado na Figura 57.

Já no Lote 3, apenas a amostra Am-01 apresentou sinais de DP. Todavia, a análise da última forma de onda de corrente não revelou diferenças significativas em relação aos impulsos iniciais.

Assim as amostras Am-02 e Am-03 do Lote 3 apresentaram falha por explosão. Contudo, verificou-se uma diferença significativa na quantidade de impulsos suportados por essas amostras: a Am-02 suportou apenas dois impulsos, enquanto a Am-03 suportou vinte e quatro impulsos, conforme apresentado na Tabela 3. Essa diferença de comportamento sugere particularidades construtivas e microestruturais entre os dispositivos, que serão investigadas posteriormente por meio de ensaios físico-químicos.

## 5.2. Resultados das Medições de Descargas Parciais

Para o ensaio de medição de DP, todas as amostras apresentaram, inicialmente, sinais de carga inferiores a 4 pC durante um período de análise de 30 s, após a fase de exploração.

Durante o processo de envelhecimento dos três lotes, apenas após o último impulso aplicado, as amostras Am-02 e Am-03 do Lote 1 e a amostra Am-01 do Lote 3 apresentaram sinais de carga acima de 10 pC, provenientes de DP, conforme definido pela norma ABNT NBR 16050 [8].

Os sinais das demais peças mantiveram-se abaixo de 10 pC ao longo do processo de degradação. A Tabela 4 apresenta o valor máximo de carga antes e após o envelhecimento progressivo de cada amostra.

Tabela 4. Sinais máximos de carga antes e após o envelhecimento de cada amostra.

|                         | Lote 1 |        |        | Lote 2 |       |       | Lote 3 |       |       |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|                         | Am-01  | Am-02  | Am-03  | Am-01  | Am-02 | Am-03 | Am-01  | Am-02 | Am-03 |
| <b>Carga antes (pC)</b> | 3,63   | 3,70   | 3,48   | 0,94   | 0,96  | 0,94  | 0,91   | 1,07  | 0,94  |
| <b>Carga após (pC)</b>  | 1,70   | 401,00 | 103,00 | 0,98   | 0,80  | 0,90  | 55,20  | -     | 1,06  |

Os gráficos de cada amostra que apresentou DP são exibidos na Figura 59, Figura 60 e Figura 61, assim como os respectivos PRPD.

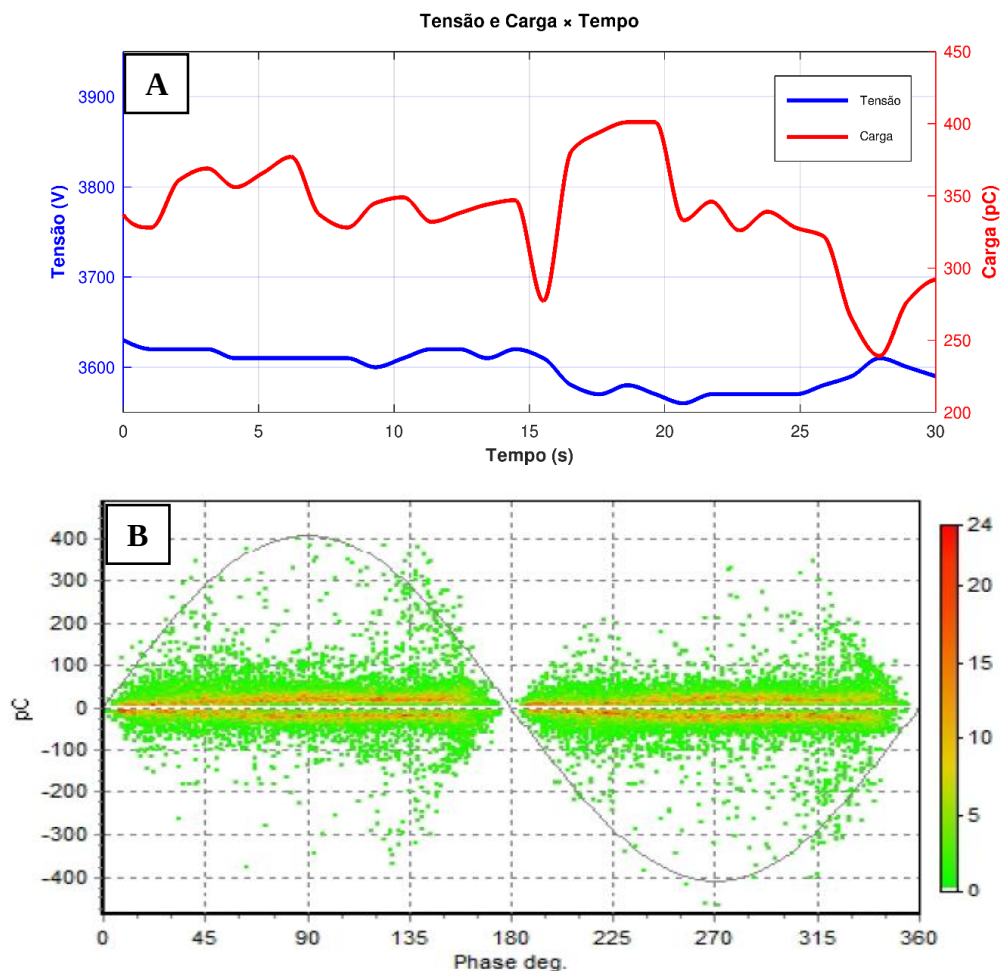


Figura 59. Resultado da última medição de DP (A) e do respectivo PRPD (B) da amostra Am-02 do Lote 1.

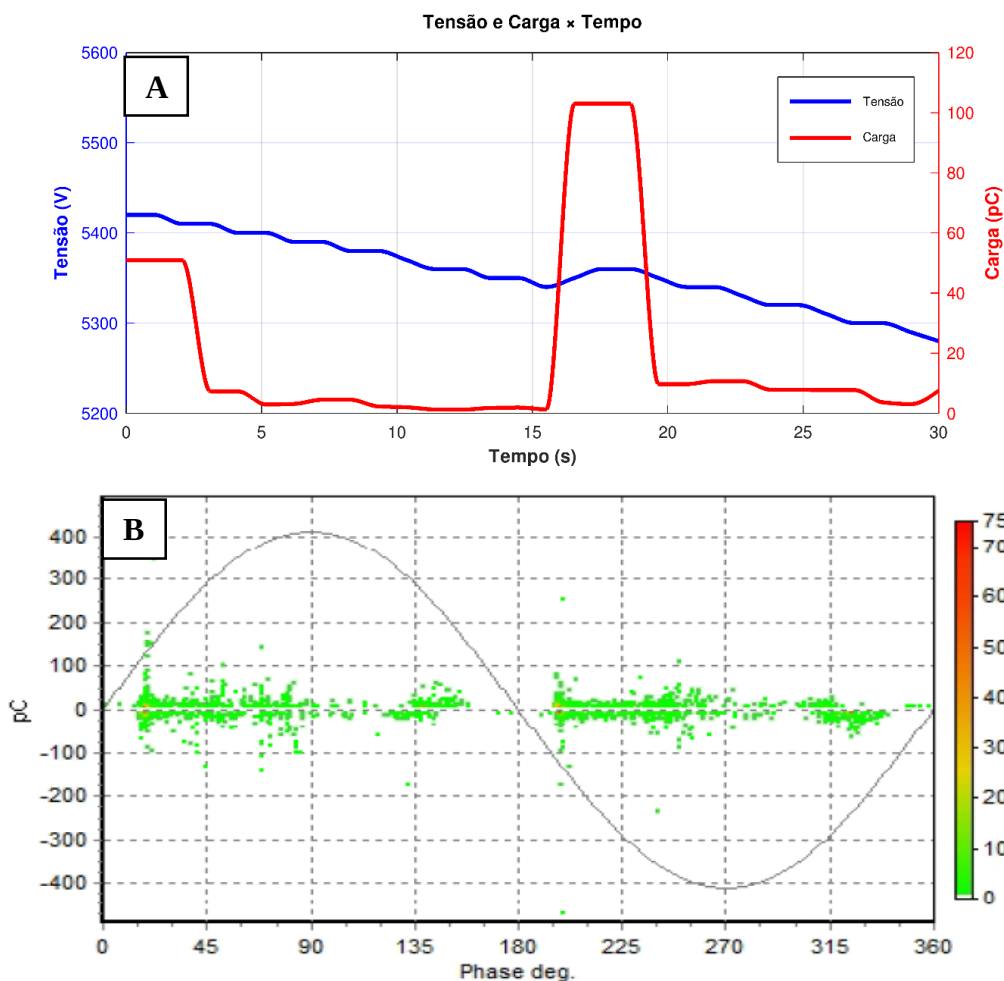


Figura 60. Resultado da última medição de DP (A) e do respectivo PRPD (B) da amostra Am-03 do Lote 1.

Conforme analisado na seção 5.1, após a identificação dos sinais de DP na amostra Am-03 do Lote 1, esta apresentou falha por impulso. Esse caso pode ser interpretado como um alerta de possível falha final quando há o aparecimento de DP nos para-raios. Todavia, esse teste de impulso adicional, realizado após o surgimento de sinais de DP, não foi repetido nas demais amostras que apresentaram esse fenômeno, em razão de limitações experimentais ocorridas durante a condução da pesquisa.

Dessa forma, embora esse resultado indique um possível potencial da técnica como sinal de alerta para falha iminente, a ausência de repetição do procedimento nas demais amostras impede a generalização dessa observação, tornando necessários ensaios adicionais para confirmar essa hipótese.

Além desses ensaios de DP pelo método normativo [7], utilizou-se, como ferramenta auxiliar, a antena de ultrassom para investigar sinais audíveis provenientes de DP. Entretanto, as medições sofreram interferências externas, o que dificultou a análise do sinal proveniente de DP. Além disso, os sinais não puderam ser adquiridos devido às limitações do aparelho.

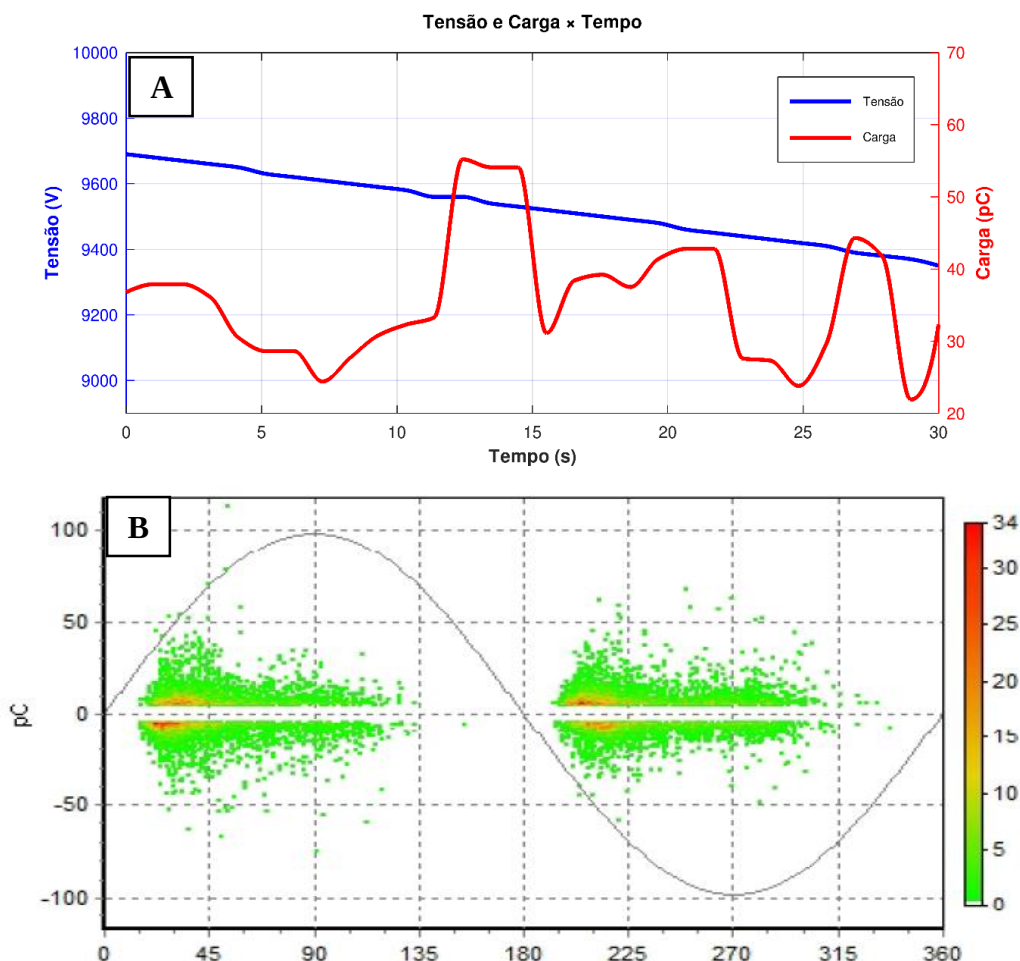


Figura 61. Resultado da última medição de DP (A) e do respectivo PRPD (B) da amostra Am-01 do Lote 3.

A partir desses resultados, nota-se que o parâmetro de DP apresentou sensibilidade limitada para caracterização do processo de envelhecimento dos para-raios. Essa condição já era esperada, considerando que estudos da literatura relatam que a DP apresenta limitações técnicas no acompanhamento da degradação sob determinadas condições, como em campo [25, 53, 88]. Isso ocorre, uma vez que a resposta da DP pode não apresentar comportamento uniforme, além de sofrer influência de fatores externos e das próprias características construtivas dos dispositivos.

### 5.3. Resultados das Medições de Corrente de Fuga

Nesta seção, são apresentados os resultados dos ensaios de corrente de fuga das amostras submetidas ao processo de envelhecimento. Para isso, em todas as medições, os dados da corrente de fuga total e da tensão associada eram adquiridos para análise posterior no Octave. Um exemplo de medição realizada em laboratório é apresentado na Figura 62.

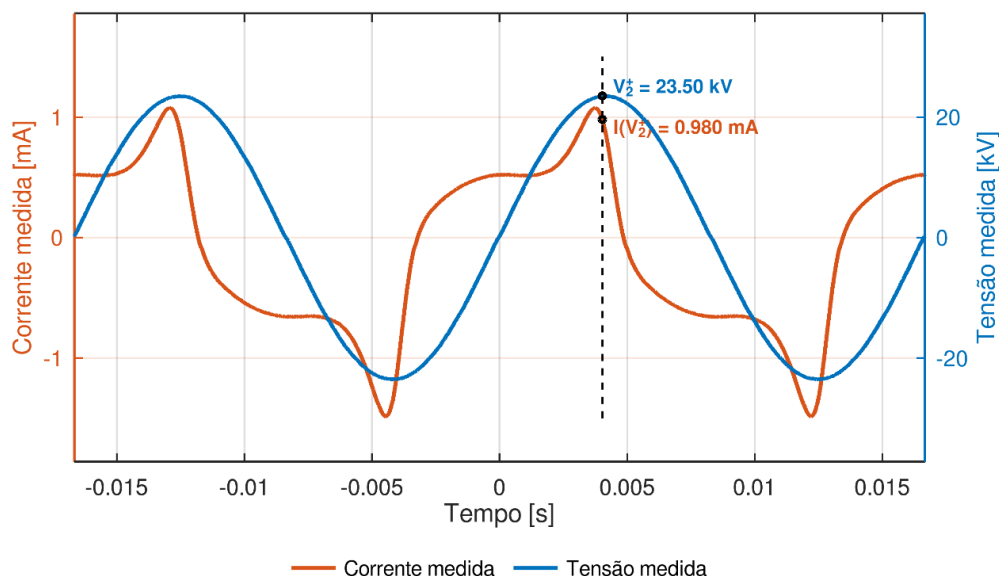


Figura 62. Exemplo de medição da corrente de fuga total em uma amostra de para-raios de 15 kV.

A partir da medição e, posteriormente, da decomposição da corrente de fuga, foram analisados diferentes parâmetros associados ao processo degradativo da corrente de fuga, tais como a corrente de referência, o conteúdo harmônico da componente resistiva, a distorção harmônica total, a potência dissipada e a polaridade da corrente de fuga total.

Como observação, algumas amostras avaliadas apresentaram redução de determinados parâmetros próximos às condições finais de envelhecimento, os quais podem estar associados à pré-falha ou ao aparecimento de DP. Desse modo, foi realizada uma análise desses casos, considerando apenas o intervalo de dados compreendido entre a condição inicial da amostra e o ponto imediatamente anterior ao início do parâmetro analisado, denominado “trecho progressivo”.

Além disso, para a amostra Am-02 do Lote 3, considerando que foi realizada apenas uma medição da corrente de fuga, dado que ela suportou dois impulsos antes de apresentar falha por explosão, não foi realizada a análise dos parâmetros associados à corrente de fuga.

### 5.3.1. Corrente de referência

Para a medição da corrente de fuga total, tomou-se como referência o pico positivo da tensão aplicada, correspondente ao instante em que a componente resistiva da corrente de fuga atinge seu valor máximo positivo. Assim, para a condição em que essa componente apresentava valor de pico igual a 1 mA, obtinham-se simultaneamente as formas de onda da tensão aplicada e da corrente de fuga total. Esse procedimento foi seguido durante todo o período de envelhecimento das amostras.

Dessa forma, para cada lote são exibidos os gráficos correspondentes ao pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga e à tensão associada.

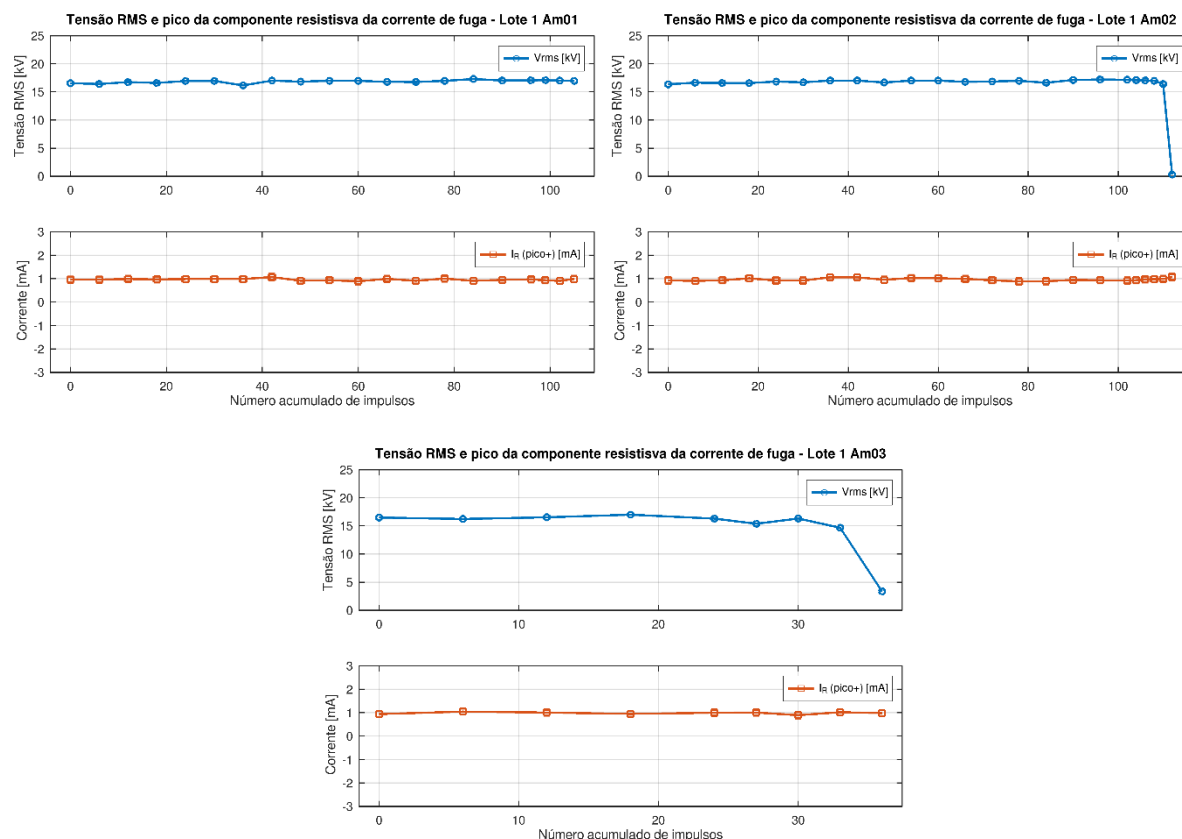


Figura 63. Pico positivo da corrente de fuga e da tensão RMS durante o processo de envelhecimento do Lote 1.

Conforme a Figura 63, embora o pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga tenha se mantido em 1 mA ao longo de todo o processo de envelhecimento das amostras, observa-se que a tensão permaneceu aproximadamente constante até próximo das últimas medições da corrente de fuga nas amostras Am-02 e Am-03. Após isso, a tensão apresentou uma queda brusca para o mesmo valor de corrente. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que ambas as amostras apresentaram DP ao final de seus períodos de envelhecimento.

Para as amostras do Lote 2, exibidas na Figura 64, nota-se que o comportamento observado no Lote 1 foi semelhante; porém, nesse caso, a amostra Am-01 apresentou redução do valor de tensão no último ponto medido. Essa ocorrência pode estar relacionada a uma condição de pré-falha do para-raios.

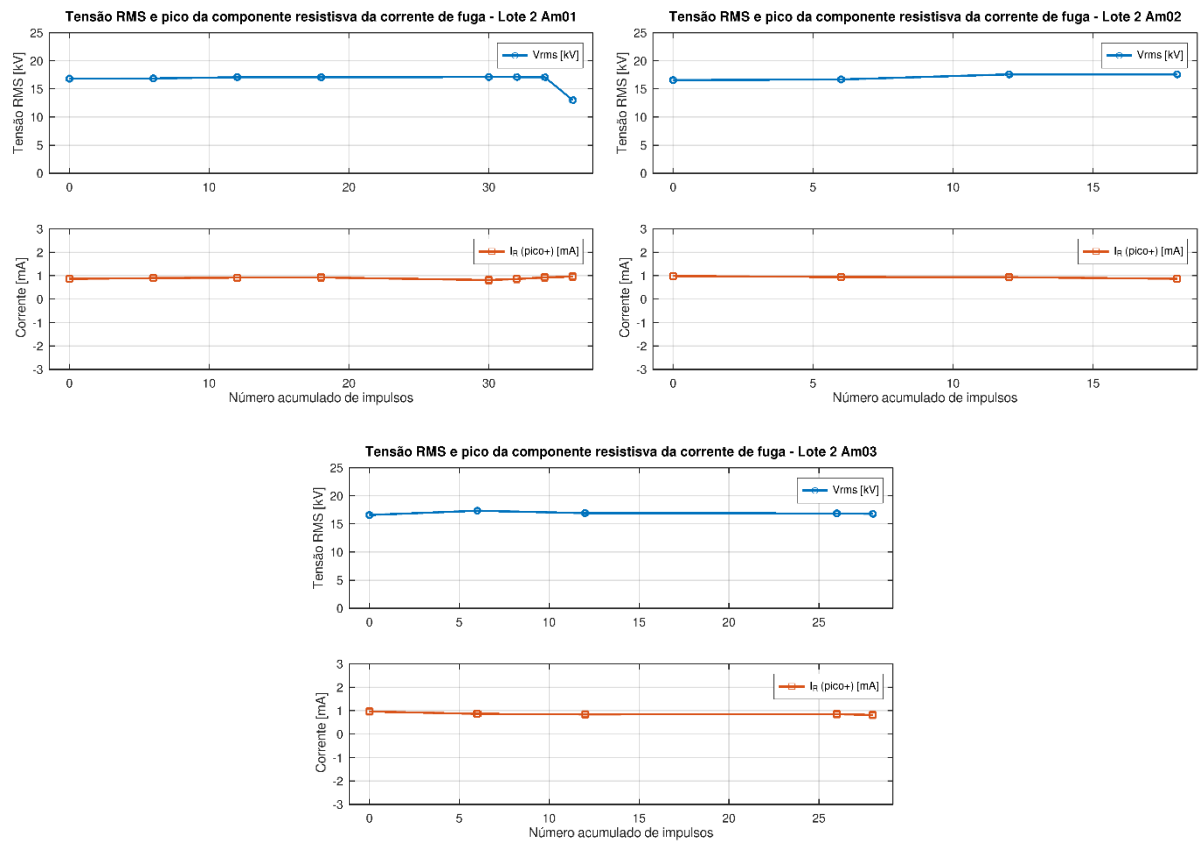


Figura 64. Pico positivo da corrente de fuga e da tensão RMS durante o processo de envelhecimento do Lote 2.

Já para o Lote 3, os resultados exibidos na Figura 65 apresentam o mesmo comportamento observado nos lotes 1 e 2. Dessa forma, considerando-se que a amostra Am-01 desse lote apresentou sinais de DP no final do processo de envelhecimento, nota-se que a diminuição da tensão no último ponto medido pode estar diretamente relacionada ao fenômeno de DP.

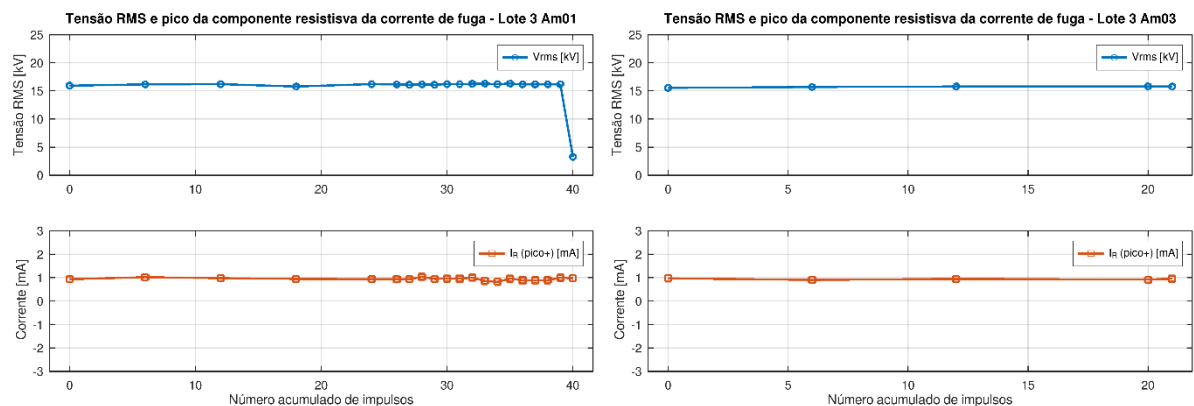


Figura 65. Pico positivo da corrente de fuga e da tensão RMS durante o processo de envelhecimento do Lote 3.

### 5.3.2. Conteúdo harmônico da componente resistiva

Para cada amostra de para-raios, foram analisados, a partir da componente resistiva da corrente de fuga, os harmônicos ímpares ao longo do processo de envelhecimento. Assim, para

o Lote 1, os gráficos de tendência de cada amostra são apresentados na Figura 66. Como resultado, nota-se que o conteúdo harmônico permaneceu praticamente constante ao longo do processo, embora as amostras Am-02 e Am-03 tenham apresentado alterações abruptas nas proximidades das condições finais de envelhecimento.

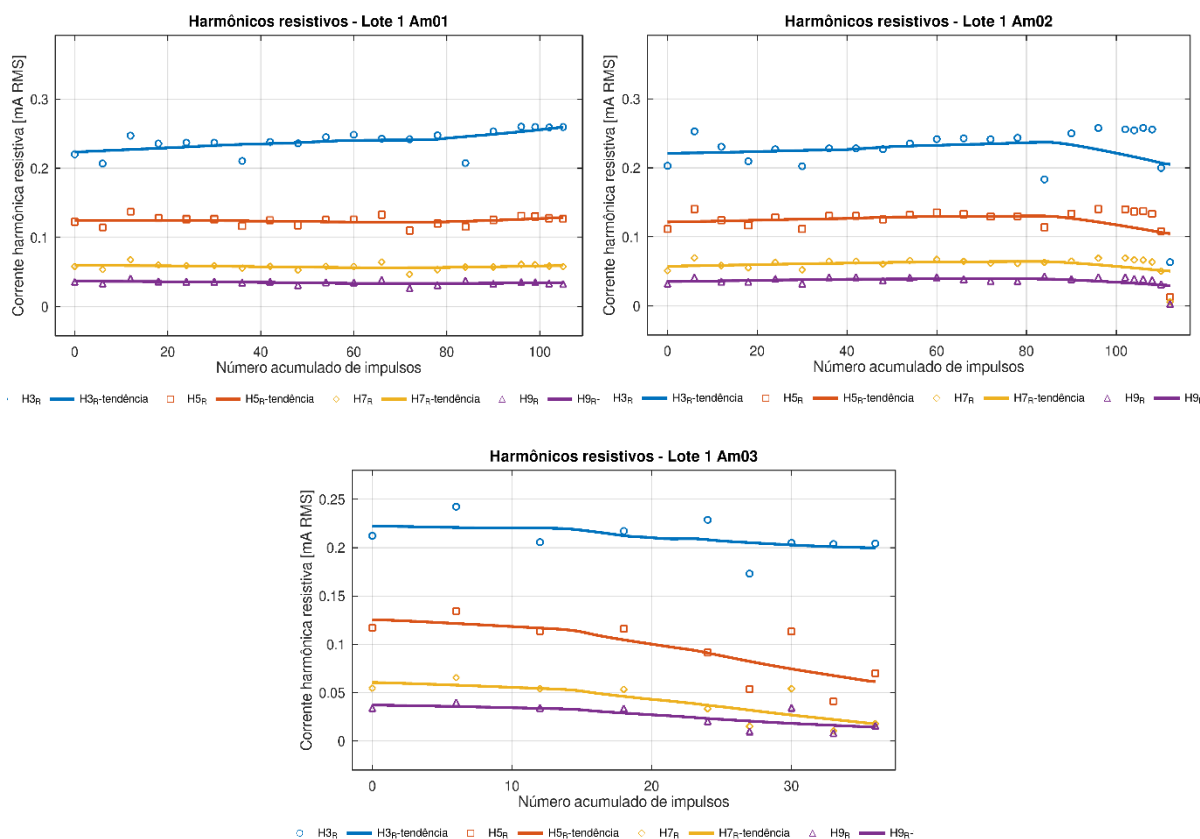


Figura 66. Harmônicos resistivos ímpares ao longo do processo de envelhecimento do Lote 1.

Para o Lote 2, o conteúdo harmônico de cada peça é exposto na Figura 67. Nesse sentido, nota-se que os harmônicos apresentaram crescimento significativo ao longo do processo de envelhecimento em todas as amostras, sendo o terceiro harmônico o de maior acúmulo.

Como observação, a amostra Am-01 apresentou um decaimento ao final do processo de envelhecimento, característico de ocorrência de pré-falha. Dessa forma, nota-se que esse lote mostrou-se sensível ao envelhecimento provocado pelos impulsos de corrente.

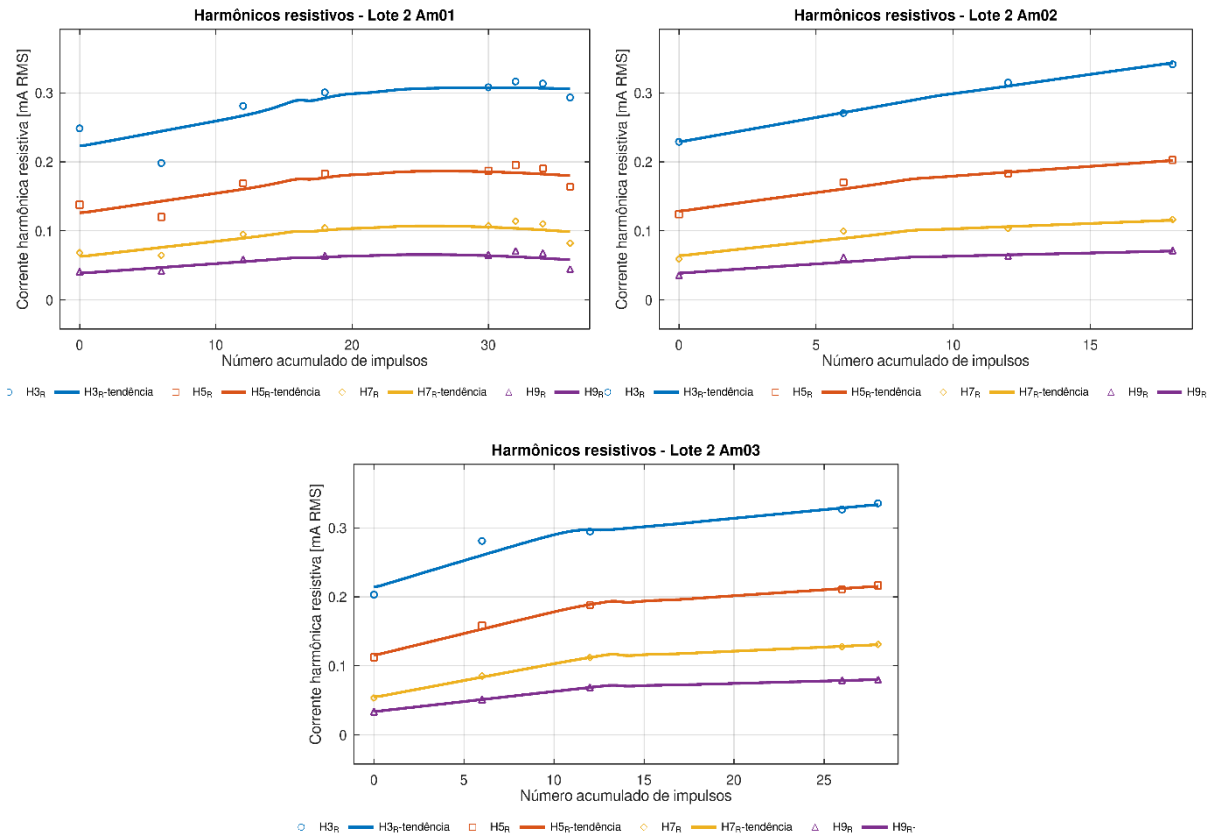


Figura 67. Harmônicos resistivos ímpares ao longo do processo de envelhecimento do Lote 2.

Para o Lote 3, os resultados harmônicos das amostras Am-01 e Am-03 são apresentados na Figura 68.

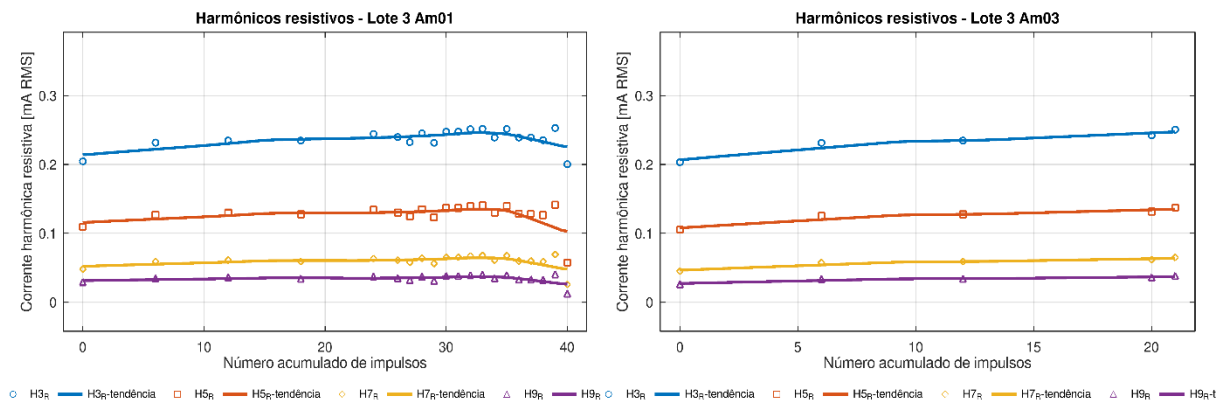


Figura 68. Harmônicos resistivos ímpares ao longo do processo de envelhecimento do Lote 3.

Os resultados do Lote 3 também mostram que os harmônicos apresentaram crescimento ao longo do processo de envelhecimento das amostras. Porém, como observado nas amostras Am-02 e Am-03 do Lote 1 e Am-01 do Lote 2, ao final do envelhecimento, os harmônicos da Am-01 do Lote 3 caíram bruscamente.

Esse comportamento pode estar diretamente relacionado ao surgimento de condições críticas de operação, como falha e aparecimento de DP, dado que parte dessas peças apresentou

DP, como Am-02 e Am-03 do Lote 1 e Am-01 do Lote 3, e outra parte apresentou maior número de impulsos suportados em comparação ao próprio lote, como ocorreu com a amostra Am-01 do Lote 2.

De maneira a comparar os conteúdos harmônicos entre os lotes, a Figura 69 apresenta um gráfico de barras do resultado médio de harmônicos iniciais e finais de cada lote.

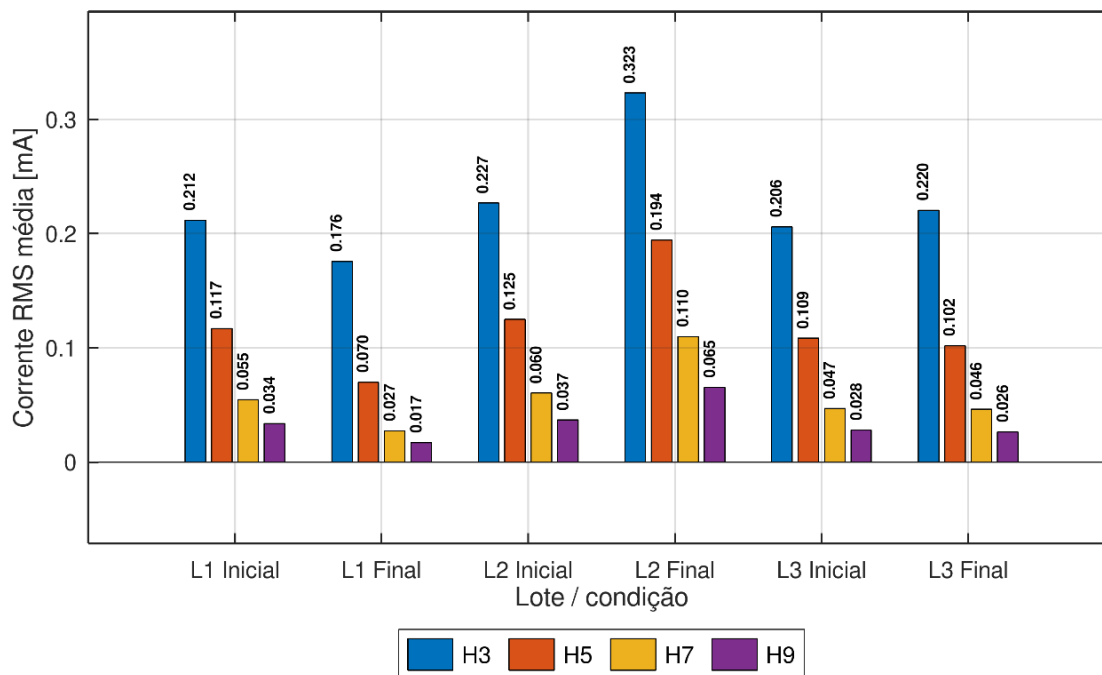


Figura 69. Harmônicos resistivos médios iniciais e finais de cada lote.

A partir do gráfico, nota-se que apenas o Lote 1 apresentou diminuição do conteúdo harmônico, enquanto os demais lotes apresentaram aumento do conteúdo harmônico, em especial do terceiro harmônico. Isso pode ser justificado pela queda brusca do valor harmônico ao final do processo de envelhecimento das amostras Am-02 e Am-03 do Lote 1, possivelmente relacionada ao surgimento de DP.

Assim, realizou-se a análise do conteúdo harmônico médio entre os lotes, considerando apenas o trecho de degradação progressiva de cada amostra, como exibido na Figura 70. Dessa maneira, é possível verificar que em todos os lotes o crescimento harmônico foi proporcional ao envelhecimento causado pelos impulsos de corrente, sugerindo que a intensificação das distorções harmônicas está diretamente relacionada ao avanço do processo degradativo dos blocos de ZnO.

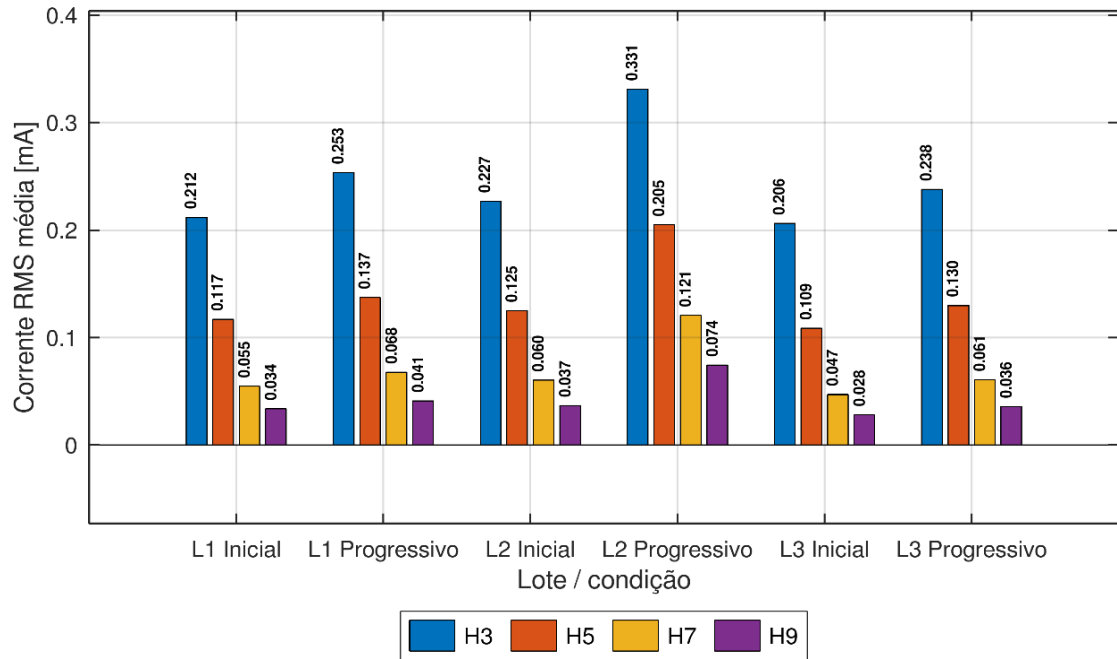


Figura 70. Harmônicos resistivos médios iniciais e finais do trecho progressivo de cada lote.

### 5.3.3. Distorção harmônica total da componente resistiva

Conforme observado no comportamento harmônico de cada amostra durante o processo de degradação, o THD da componente resistiva da corrente de fuga apresentou comportamento semelhante entre os lotes analisados. A Figura 71 ilustra essa condição para cada lote ensaiado.

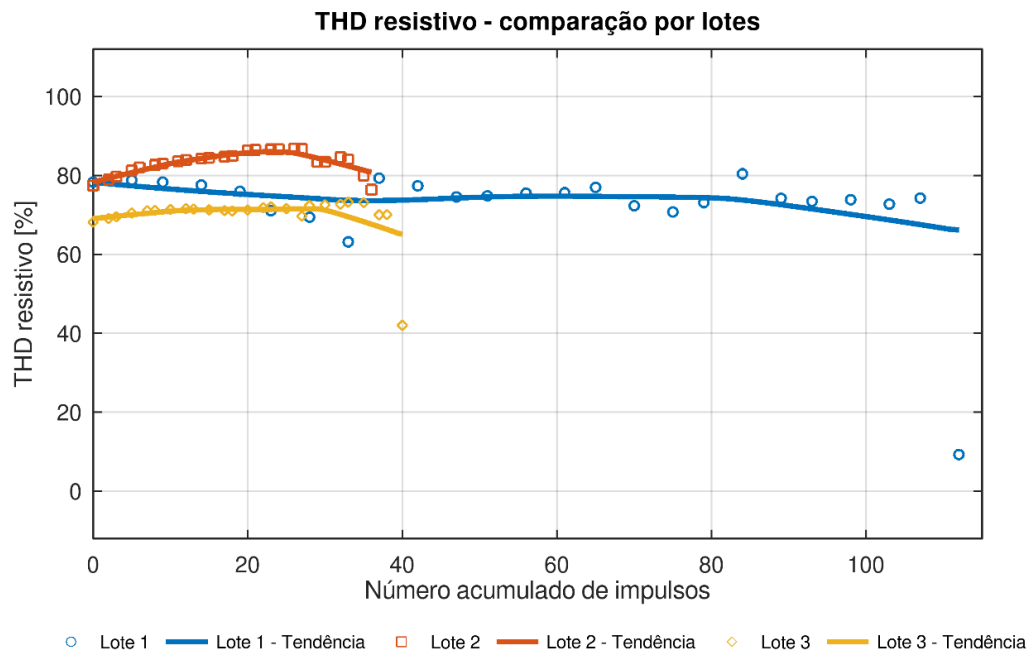


Figura 71. Gráfico de tendência do THD total a partir da componente resistiva de cada lote.

De modo geral, observou-se um aumento lento e gradual do parâmetro ao longo das aplicações de impulso. Entretanto, próximo às condições finais de envelhecimento, houve redução abrupta do THD, em especial nos lotes 1 e 3, correspondentes às amostras que apresentaram condições de pré-falha e sinais de DP.

Nesse contexto, o cálculo do THD pode ser diretamente influenciado por esses pontos finais de instabilidade elétrica, o que resulta em valores negativos desse parâmetro. Assim, também foram calculados os THD para a condição do trecho progressivo, a fim de avaliar o comportamento do trecho diante do envelhecimento de cada peça, como exibido na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação do THD resistivo completo e do trecho progressivo para cada lote.

|                                        | Lote 1 |        |        | Lote 2 |       |       | Lote 3 |       |       |
|----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|                                        | Am-01  | Am-02  | Am-03  | Am-01  | Am-02 | Am-03 | Am-01  | Am-02 | Am-03 |
| <b>THD<sub>R</sub> completo (%)</b>    | -13,59 | -88,05 | -40,95 | -3,63  | 9,27  | 16,14 | -39,20 | -     | 7,20  |
| <b>THD<sub>R</sub> progressivo (%)</b> | 0,00   | 7,99   | 1,03   | 6,73   | 14,43 | 16,34 | 6,29   | -     | 7,20  |

A partir da Tabela 5, percebe-se que a amostra Am-01 do Lote 1 obteve THD<sub>R</sub> no trecho progressivo de aproximadamente 0 %. Esse resultado não indica ausência de variação do parâmetro, mas está relacionado ao comportamento oscilatório observado ao longo do envelhecimento, conforme exibido na Figura 72.

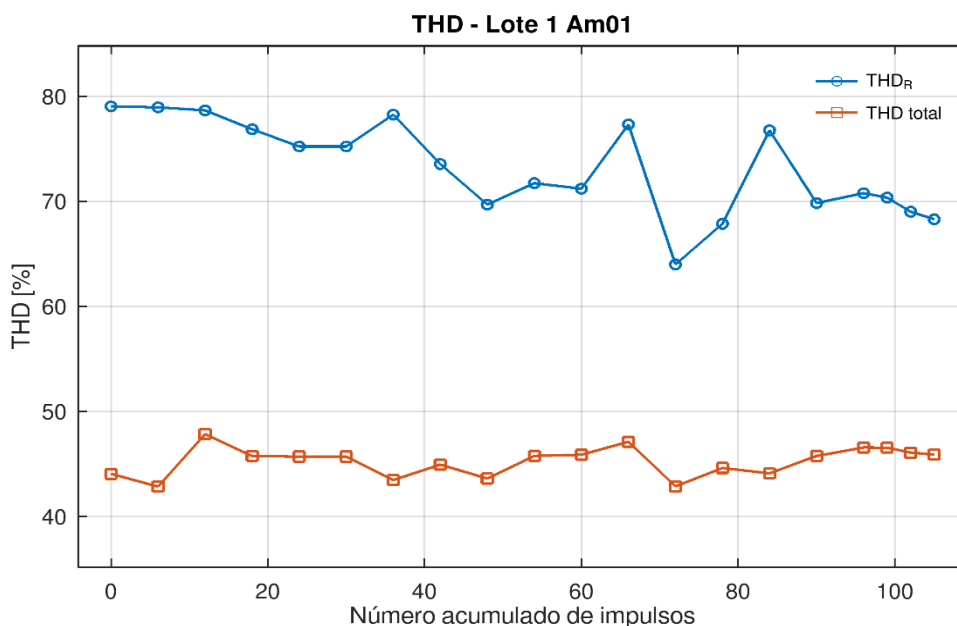


Figura 72. Gráfico de cada medição do THD total a partir da componente resistiva da amostra Am-01 do Lote 1.

Nesse sentido, verifica-se que THD<sub>R</sub> sofreu sucessivas elevações e reduções, sem a formação de um trecho de crescimento contínuo bem definido. Dessa forma, o algoritmo

utilizado para identificação do trecho progressivo selecionou uma região limitada dos dados, o que resultou em um crescimento progressivo nulo. Em contrapartida, ao se considerar todo o histórico de medições, observa-se uma redução de 13,59% no  $THD_R$  total.

Por fim, apesar de, na amostra Am-01 do Lote 1, o TDH não apresentar sensibilidade ao envelhecimento, nas demais amostras, considerando-se o trecho progressivo, esse parâmetro apresenta tendência crescente ao longo do envelhecimento.

#### 5.3.4. Potência dissipada

Esse parâmetro é muito utilizado na avaliação da integridade dos para-raios, dado que o aumento da potência dissipada indica maior dissipação de energia interna e, conseqüentemente, avanço da degradação elétrica do dispositivo. Assim, para o Lote 1, o resultado desse parâmetro é exibido na Figura 73.

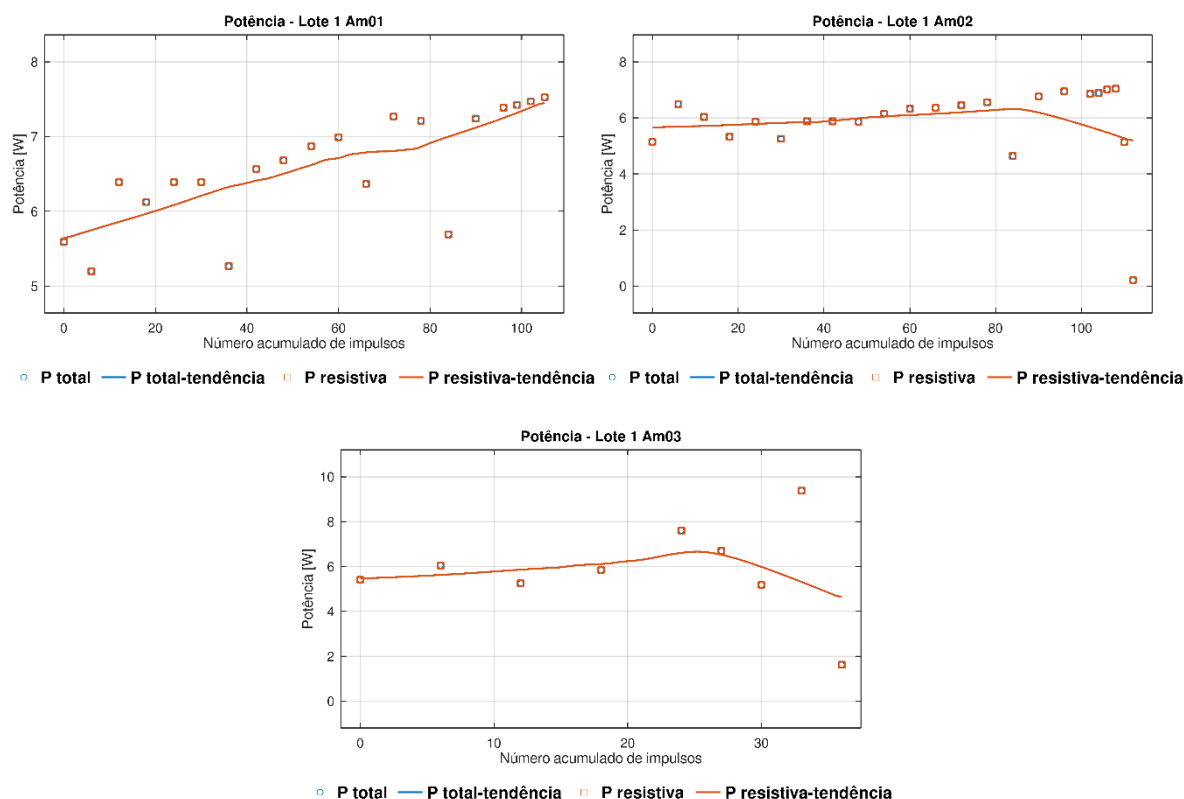


Figura 73. Potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento do Lote 1.

Embora tenha sido observado crescimento da potência ao longo do envelhecimento das amostras do Lote 1, verificou-se um comportamento mais oscilatório e menos progressivo em comparação com o Lote 2, conforme mostrado na Figura 74. Além disso, enquanto as amostras Am-02 e Am-03 do Lote 1 apresentaram tendência de crescimento da potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento, seguida de redução nos estágios finais, período em que

também foram observadas DP, a amostra Am-01 apresentou maior variabilidade entre as medições, o que indicou um processo degradativo menos uniforme.

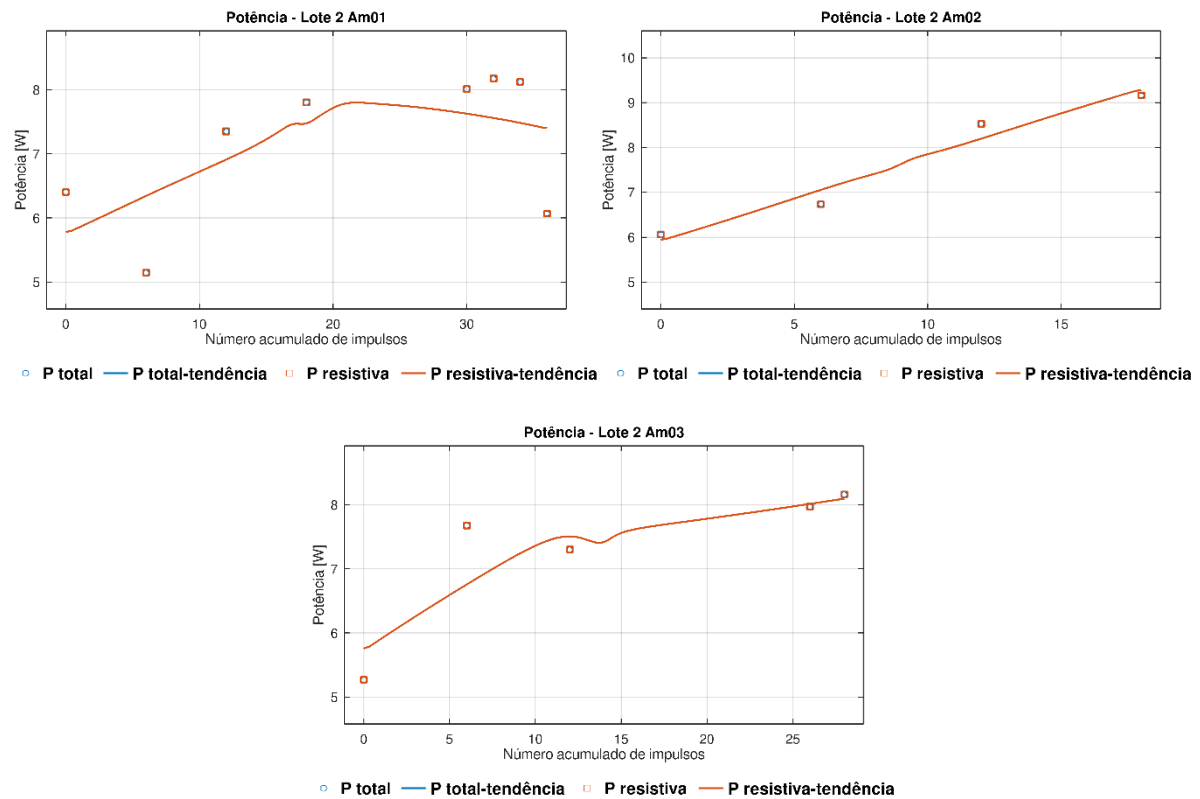


Figura 74. Potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento do Lote 2.

Nos gráficos da potência dissipada do Lote 2, nota-se que todas as amostras apresentaram avanço da degradação interna conforme a aplicação de impulsos de corrente. Apenas a amostra Am-01 apresentou diminuição da potência ao final do processo, conforme observado nos demais parâmetros desta seção, o que pode ser justificado por uma condição de pré-falha que culminou em falha por explosão final.

Para o Lote 3, a potência dissipada em cada amostra é exibida na Figura 75.

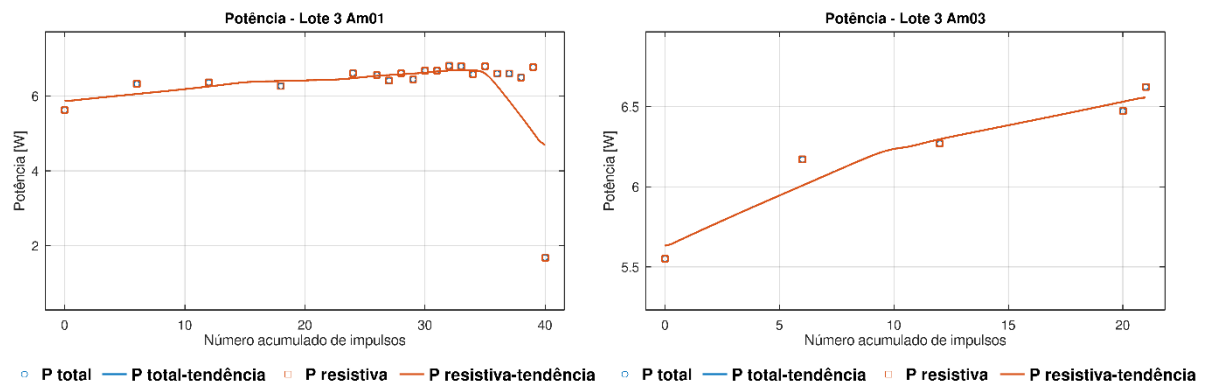


Figura 75. Potência dissipada ao longo do processo de envelhecimento do Lote 3.

Os resultados do Lote 3 apresentaram-se sensíveis ao envelhecimento por impulso de corrente, dado que é possível verificar o aumento gradual da potência dissipada conforme a ocorrência de impulso. Apenas a amostra Am-01 apresentou uma queda brusca no último valor da potência, comportamento que pode indicar a ocorrência de alterações associadas ao estágio avançado de degradação, no qual também foram observadas DP.

Nesse sentido, considerando-se apenas o trecho progressivo para análise da potência dissipada pelas amostras, o Lote 1, assim como os demais lotes, apresentou uma tendência crescente, de modo a justificar a associação entre o aumento da dissipação de potência e o avanço degradativo das amostras. Esse resultado adicional é observado no gráfico da Figura 78.

### 5.3.5. Polaridade da corrente de fuga total

Esse parâmetro foi analisado previamente durante as medições da corrente de fuga total de modo que, na maioria das amostras dos lotes, a tendência era o aumento gradual do pico negativo da corrente de fuga à medida que eram aplicados os impulsos de corrente. Assim, esta subseção mostra a relação entre a polaridade e a aplicação dos impulsos em cada lote, com base na Figura 76.

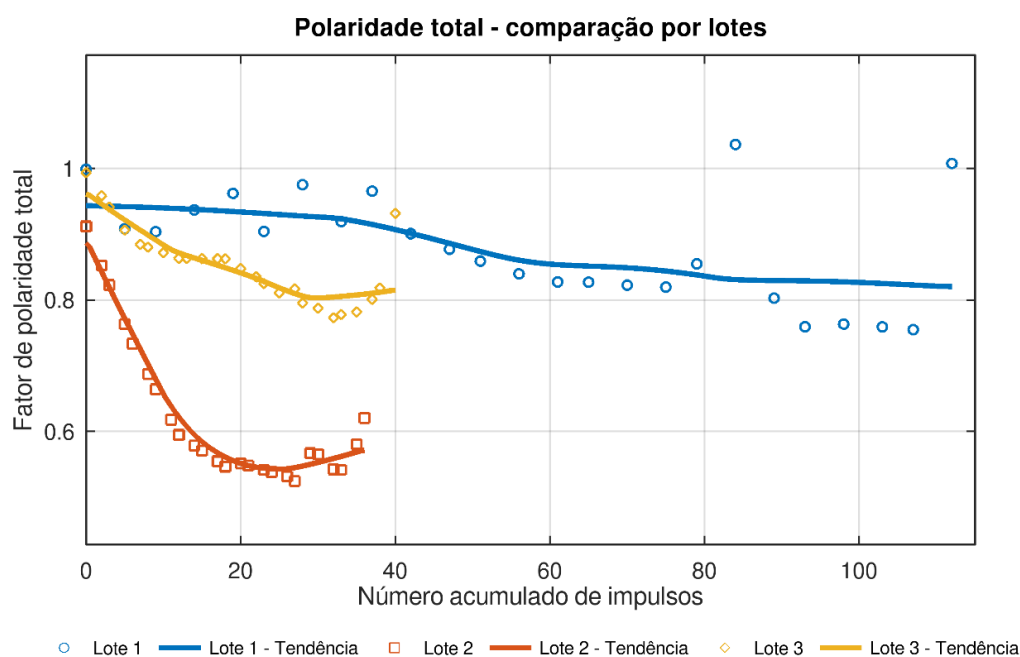


Figura 76. Polaridade da corrente de fuga total. Comparação por lotes.

Observa-se uma redução gradual do fator de polaridade com o envelhecimento das amostras, o que indica alterações na simetria da forma de onda da corrente de fuga e no comportamento não linear desses dispositivos em função do processo degradativo.

Os resultados mostraram que o Lote 2 apresentou maior polarização em comparação com os demais lotes, indicando alterações mais significativas no comportamento da corrente de fuga dessas amostras ao longo do envelhecimento. Outrossim, o aumento da polarização visualizado principalmente nos lotes 1 e 3 nos estágios finais do envelhecimento pode estar associado ao estágio de pré-falha dos dispositivos, no qual também foram observadas DP.

### 5.3.6. Comparação entre os parâmetros monitorados

A Figura 77 apresenta a comparação dos parâmetros monitorados durante o processo de envelhecimento das amostras de para-raios por lote.

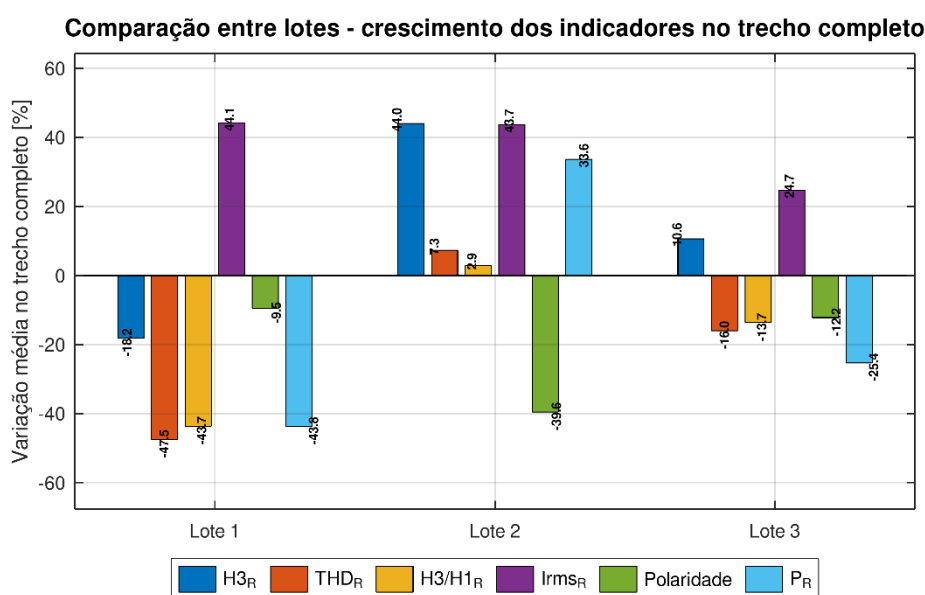


Figura 77. Parâmetros monitorados ao longo de todo o processo de envelhecimento. Comparação por lotes.

Os valores negativos de alguns parâmetros do Lote 1 e do Lote 3 estão relacionados aos dados de corrente de fuga e de tensão aplicada ao final do processo de degradação das amostras. Dessa forma, para facilitar a interpretação dos parâmetros monitorados, também foi elaborado um gráfico comparativo (Figura 78) considerando o trecho progressivo.

Nesse sentido, nota-se que, de modo geral, os parâmetros associados à corrente de fuga apresentaram sensibilidade ao envelhecimento das amostras. Dentre eles, destacam-se a potência dissipada e o terceiro harmônico resistivo (H3<sub>R</sub>), que apresentaram crescimento ao longo do processo de envelhecimento e comportamento consistente entre os lotes analisados.

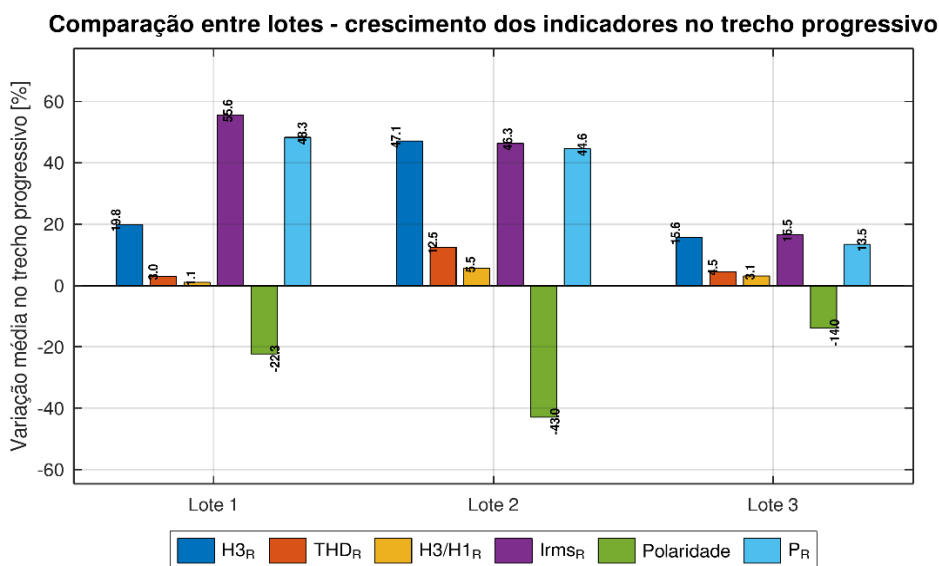


Figura 78. Parâmetros monitorados durante o processo de envelhecimento no trecho progressivo. Comparação por lotes.

O terceiro harmônico resistivo apresentou aumento ao longo do processo de envelhecimento, principalmente nos lotes 1 e 2, evidenciando sua sensibilidade às alterações elétricas associadas ao processo degradativo.

A potência dissipada também apresentou sensibilidade ao envelhecimento em todos os lotes ensaiados, o que se reflete no aumento das perdas elétricas e da dissipação de energia nas amostras ao longo do processo de degradação.

Já o THD resistivo acompanhou o envelhecimento das amostras, porém apresentou instabilidade próxima às condições de pré-falha. Por fim, a relação entre o terceiro harmônico e a componente fundamental resistiva da corrente de fuga ( $H_{3R}/H_{1R}$ ) e a polaridade contribuíram, de forma complementar, para a avaliação da condição das amostras.

### 5.3.7. Correlação entre os parâmetros monitorados

Para avaliar a correlação entre os parâmetros monitorados, a partir da medição da corrente de fuga ao longo do processo de envelhecimento das amostras, utilizou-se a análise de correlação de Pearson, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Correlação de Pearson aplicada aos parâmetros de monitoramento.

| Parâmetro          | H3 <sub>R</sub> | THD <sub>R</sub> | H3/H1 <sub>R</sub> | I <sub>RMS</sub> | P <sub>R</sub> | P <sub>ol</sub> |
|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|------------------|----------------|-----------------|
| H3 <sub>R</sub>    | 1,000           | 0,944            | 0,875              | 0,537            | 0,499          | -0,979          |
| THD <sub>R</sub>   | 0,944           | 1,000            | 0,934              | 0,477            | 0,327          | -0,897          |
| H3/H1 <sub>R</sub> | 0,875           | 0,934            | 1,000              | 0,325            | 0,265          | -0,778          |
| I <sub>RMS</sub>   | 0,537           | 0,477            | 0,325              | 1,000            | 0,774          | -0,603          |
| P <sub>R</sub>     | 0,499           | 0,327            | 0,265              | 0,774            | 1,000          | -0,555          |
| P <sub>ol</sub>    | -0,979          | -0,897           | -0,778             | -0,603           | -0,555         | 1,000           |

Conforme os resultados da Tabela 6, observou-se forte correlação positiva entre os parâmetros harmônicos da componente resistiva da corrente de fuga, destacando-se as correlações entre  $H_{3R}$  e  $THD_R$  ( $r = 0,944$ ),  $THD_R$  e  $H_3/H_{1R}$  ( $r = 0,934$ ) e  $H_{3R}$  e  $H_3/H_{1R}$  ( $r = 0,875$ ). A partir desses dados, infere-se que tais parâmetros respondem de maneira semelhante ao processo de degradação das amostras.

Nota-se também a correlação positiva entre a corrente RMS resistiva e a potência dissipada ( $r = 0,774$ ), o que evidencia a relação entre a condução resistiva e as perdas elétricas dos dispositivos.

Em relação à polaridade, verificam-se correlações negativas com os parâmetros harmônicos, como entre  $H_{3R}$  e polaridade ( $r = -0,979$ ). Nesse sentido, o resultado indica que o aumento negativo da polaridade ocorreu simultaneamente ao aumento das distorções harmônicas da corrente de fuga. Dessa forma, é notório que os resultados apresentam coerência entre os parâmetros monitorados, o que reforça as aplicações destes na avaliação do envelhecimento dos para-raios.

#### **5.4. Resultados dos Ensaios Microestruturais**

Os ensaios físico-químicos foram realizados com o objetivo de complementar as análises dos resultados elétricos. De cada lote foram selecionadas uma amostra nova e outra submetida ao envelhecimento progressivo. Para os lotes 1, 2 e 3, foram escolhidas, respectivamente, as amostras Am-03, Am-02 e Am-03. Adicionalmente, no Lote 3, os ensaios microestruturais também foram realizados na amostra Am-02, visto que ela apresentou o menor número de impulsos suportados, conforme apresentado na Tabela 3. Essa condição a torna relevante para a investigação de possíveis mecanismos associados à degradação precoce desses dispositivos.

##### **5.4.1. MOR**

Para os ensaios de microscopia ótica, utilizaram-se lentes de ampliação de 100x, 200x e 500x, de modo a visualizar diferentes características dos grãos e de seus contornos em cada amostra. Adicionalmente, foram medidas, a partir da imagem de cada amostra, a porosidade (vermelho) e a matriz granular (preto), considerando-se, para isso, a lente de ampliação de 200x.

Assim, Figura 79, Figura 80 e Figura 81 ilustram os resultados referentes ao Lote 1.

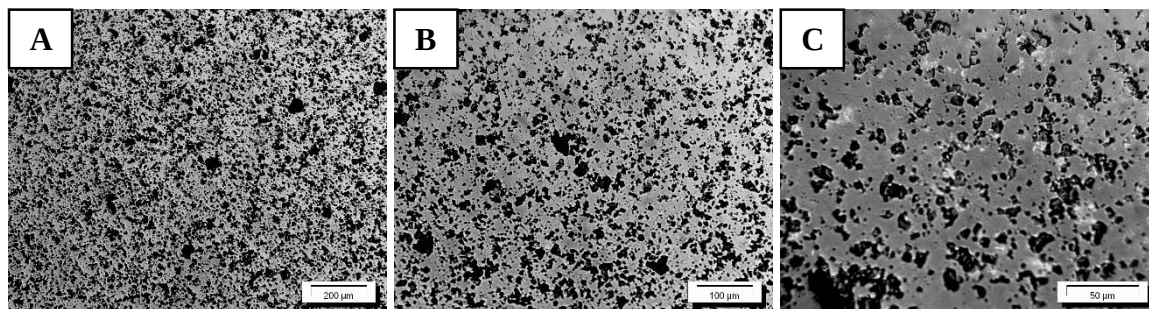


Figura 79. MOR da amostra nova do Lote 1. Ampliação de 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

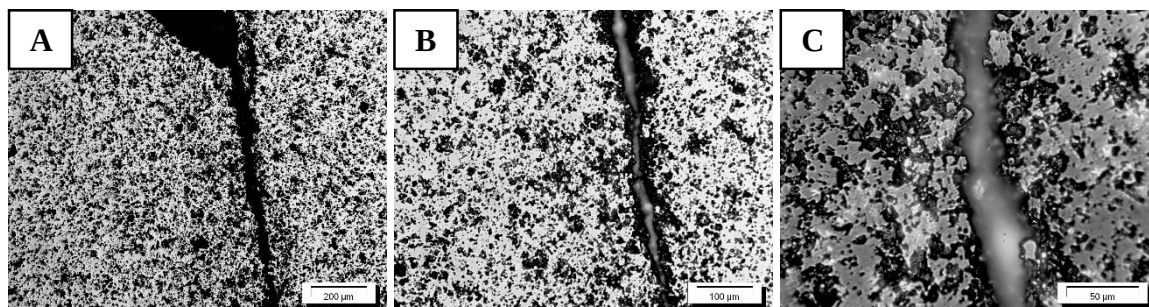


Figura 80. MOR da amostra Am-03 envelhecida do Lote 1. Ampliação de 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

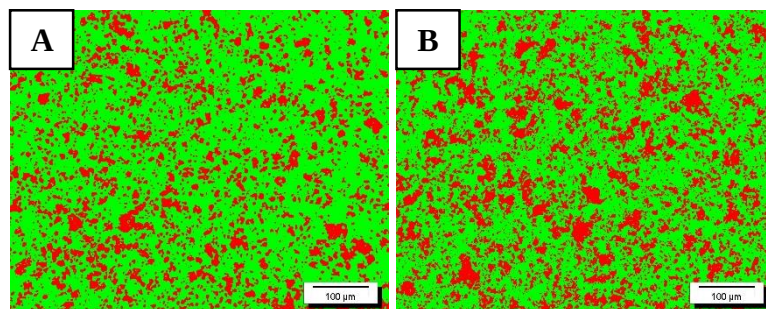


Figura 81. Medição da porosidade na amostra nova (A) e na amostra Am-03 envelhecida (B) do Lote 1.

Ao comparar os resultados, nota-se visualmente que a microscopia da amostra nova apresentou maior homogeneidade estrutural, diferentemente do que ocorre na amostra Am-03, que exibe maior porosidade, de cerca de 31,37%, e uma trinca, proveniente da falha dielétrica final, que culminou na explosão da amostra após o impulso adicional aplicado a ela.

No caso do Lote 2, conforme Figura 82, Figura 83 e Figura 84, é possível identificar o mesmo comportamento da estrutura e da porosidade entre as amostras nova e envelhecida observadas no Lote 1. Contudo, a amostra nova do Lote 2 apresentou percentual de porosidade superior ao observado no Lote 1, atingindo 33,10%, o que demonstra que, embora as amostras apresentem as mesmas características técnicas entre os lotes, diferem em sua composição estrutural.

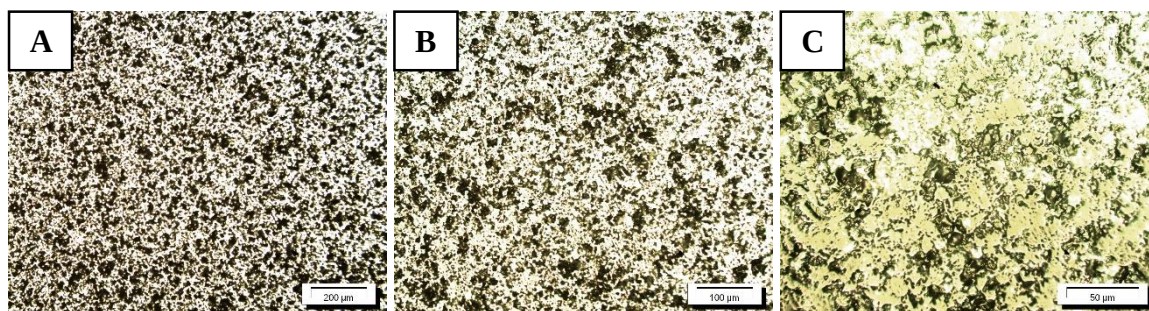


Figura 82. MOR da amostra nova do Lote 2. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

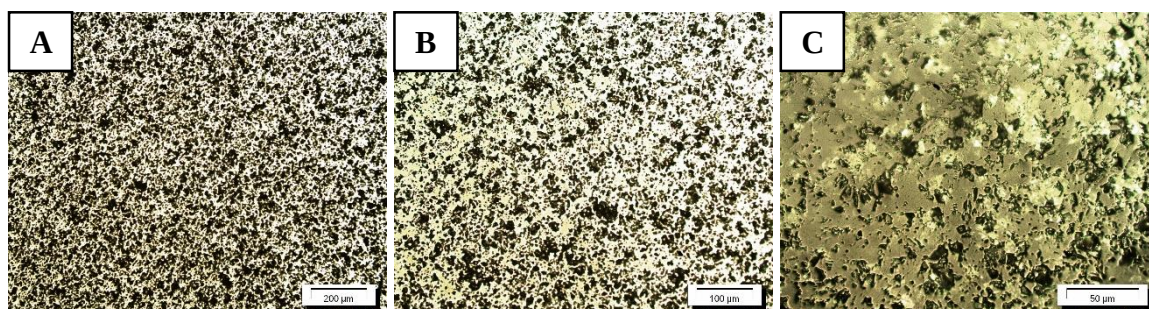


Figura 83. MOR da amostra Am-02 envelhecida do Lote 2. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

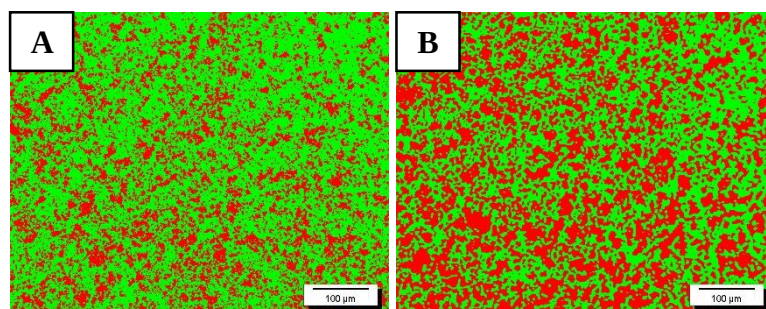


Figura 84. Medição da porosidade na amostra nova (A) e na amostra Am-02 envelhecida (B) do Lote 2.

No Lote 3, representado pela Figura 85, Figura 86, Figura 87 e Figura 88, é possível identificar, visualmente, que tanto o para-raio novo quanto os para-raios envelhecidos apresentavam uma não-homogeneidade na estrutura, de modo que há a presença de muitos poros na matriz granular.

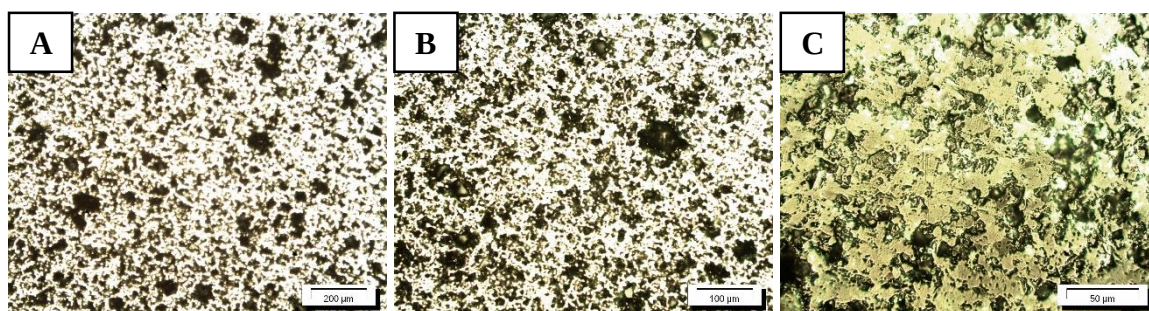


Figura 85. MOR da amostra nova do Lote 3. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

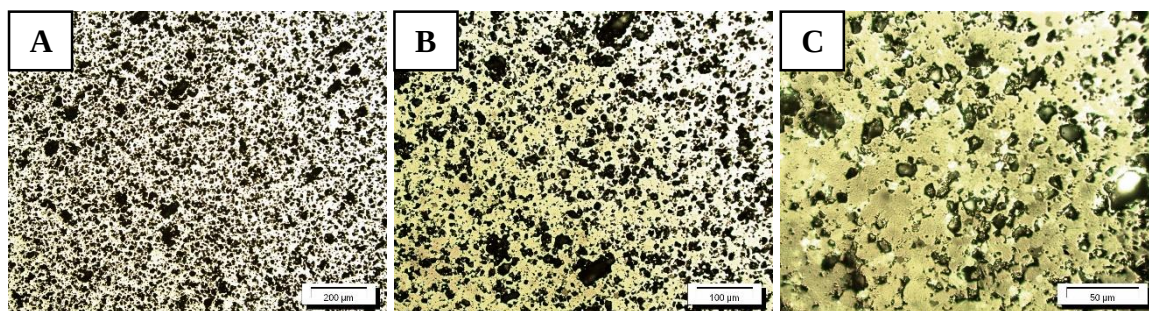


Figura 86. MOR da amostra Am-02 envelhecida do Lote 3. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

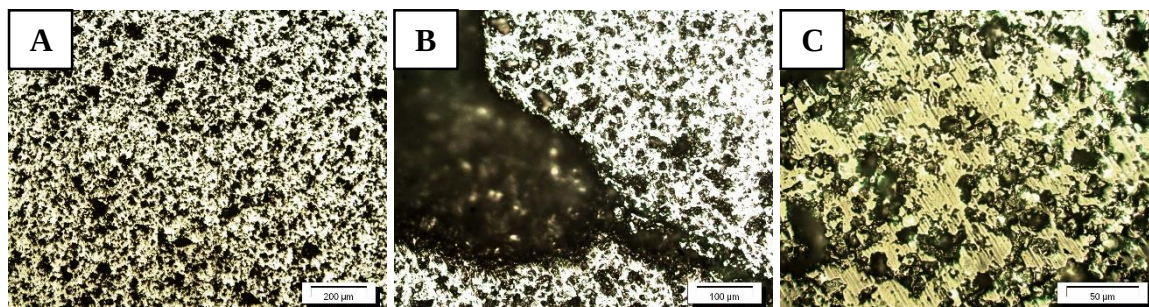


Figura 87. MOR da amostra Am-03 envelhecida do Lote 3. Ampliação 100x (A), 200x (B) e 500x (C).

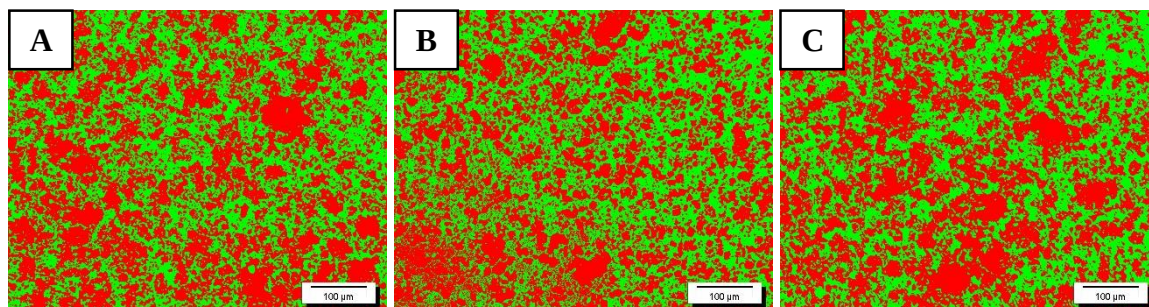


Figura 88. Medição da porosidade na amostra nova (A), na amostra Am-02 envelhecida (B) e na amostra Am-03 envelhecida (C) do Lote 3.

Nesse sentido, é possível verificar que na amostra Am-03, a qual apresentou falha por explosão após 24 impulsos, há mais perfurações em comparação com Am-02, o que vai ao encontro da teoria de envelhecimento, dado que essa amostra foi mais solicitada termicamente, devido aos impulsos, em comparação a Am-02. Essa análise também pode ser justificada pela comparação da porosidade, em que a amostra nova apresentou 55,46% e as amostras Am-02 e Am-03, respectivamente, 53,57% e 54,39%.

Tabela 7. Porcentagem da porosidade das amostras novas e envelhecidas de cada lote.

|                       | Lote 1 |       | Lote 2 |       | Lote 3 |       |       |
|-----------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
|                       | Nova   | Am-03 | Nova   | Am-02 | Nova   | Am-02 | Am-03 |
| <b>Matriz (%)</b>     | 73,96  | 68,63 | 66,90  | 51,47 | 44,54  | 46,43 | 45,61 |
| <b>Porosidade (%)</b> | 26,04  | 31,37 | 33,10  | 48,53 | 55,46  | 53,57 | 54,39 |

Além disso, percebe-se que os lotes que apresentaram maiores percentuais de porosidade, consequentemente, suportaram menos impulso de corrente, uma vez que esse parâmetro está diretamente relacionado à presença de defeitos, vazios e discontinuidades no material, os quais podem contribuir para o agravamento do processo degradativo.

#### 5.4.2. MEV

Neste ensaio, as ampliações utilizadas foram de 1000x e 2000x. Para o Lote 1, o MEV é exibido na Figura 89 e na Figura 90.

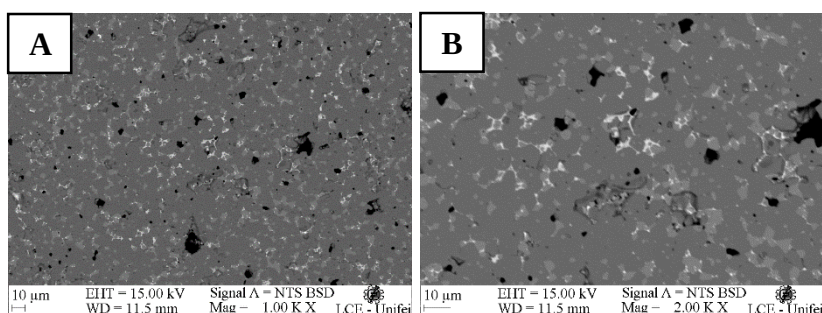


Figura 89. MEV na amostra nova do Lote 1. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

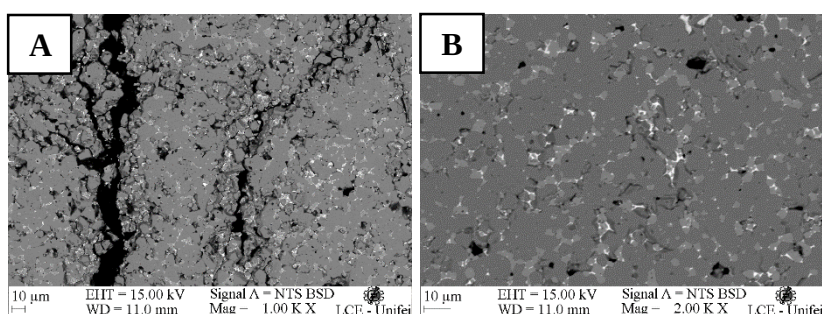


Figura 90. MEV na amostra Am-03 envelhecida do Lote 1. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

Para o Lote 2, o MEV é exibido na Figura 91 e Figura 92.

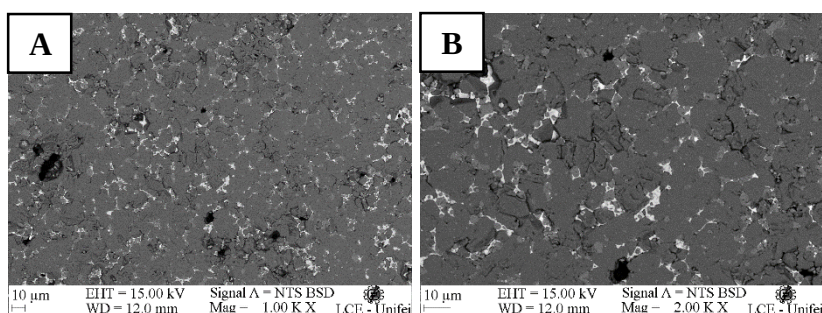


Figura 91. MEV na amostra nova do Lote 2. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

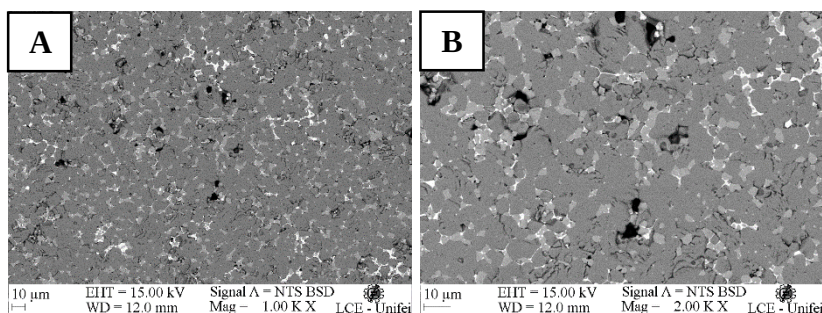


Figura 92. MEV na amostra Am-02 envelhecida do Lote 2. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

Para o Lote 3, o MEV é exibido na Figura 93, na Figura 95 e na Figura 96, em que nesta última imagem, em (A), é possível visualizar uma trinca causada pelas solicitações elétricas e térmicas, provenientes dos impulsos de corrente.

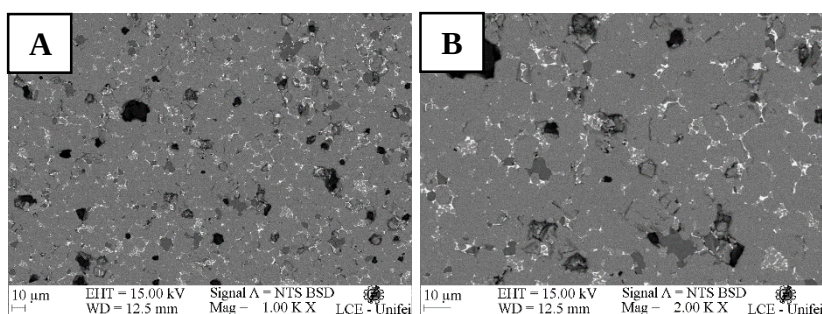


Figura 93. MEV na amostra nova do Lote 3. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

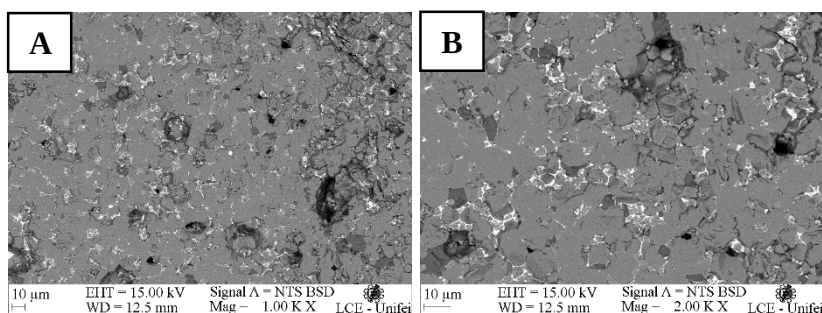


Figura 94. MEV na amostra Am-02 envelhecida do Lote 3. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

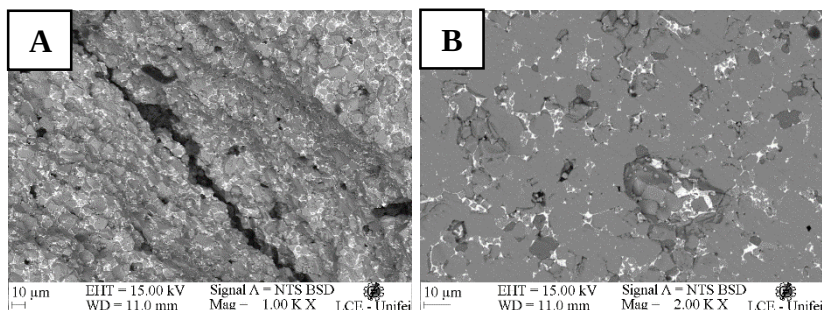


Figura 95. MEV na amostra Am-03 envelhecida do Lote 3. Ampliação 1000x (A) e 2000x(B).

A partir dos resultados apresentados de cada lote, nota-se que a análise realizada no MOR para cada peça ensaiada é válida para o MEV também, haja vista que as amostras do Lote 3 exibiram mais poros e fissuras em comparação às amostras dos demais lotes, o que justifica

o comportamento dos para-raios ao longo do processo de envelhecimento ao qual foram submetidos.

#### 5.4.3. EDS

De modo a correlacionar os resultados elétricos e microestruturais com possíveis alterações na composição dos varistores provocadas pelos impulsos de corrente, esta subseção apresenta os resultados de EDS nas amostras nova e envelhecida de cada lote. Assim, são exibidos os mapas químicos e as tabelas composicionais referentes às amostras analisadas. Essas tabelas são compostas pelos percentuais em massa (wt.%) e atômicos (at.%) dos elementos identificados em cada amostra ensaiada.

Nesse contexto, a Figura 96 ilustra os mapas químicos da amostra nova e da amostra Am-03 envelhecida do Lote 1. Além disso, a Tabela 8 apresenta os resultados comparativos entre essas duas amostras.

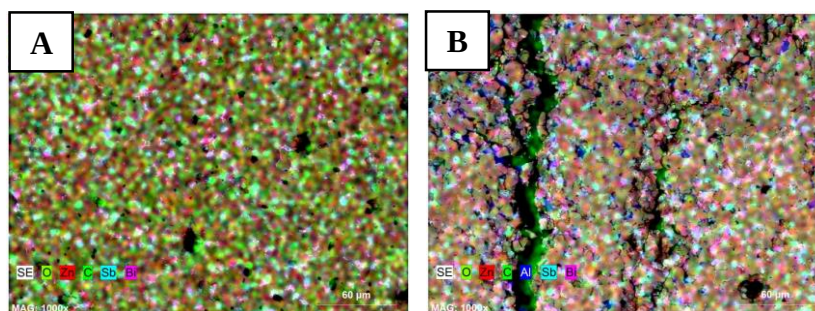


Figura 96. Mapa elementar da amostra nova (A) e amostra Am-03 envelhecida (B) do Lote 1.

Tabela 8. Comparação de dados do EDS entre a amostra nova e envelhecida do Lote 1.

| Elemento | Amostra nova |       | Amostra Am-03 |       |
|----------|--------------|-------|---------------|-------|
|          | wt.%         | at.%  | wt.%          | at.%  |
| O        | 18,13        | 42,58 | 18,07         | 42,64 |
| Zn       | 72,51        | 41,66 | 72,92         | 42,10 |
| C        | 4,70         | 14,70 | 4,50          | 14,14 |
| Sb       | 2,77         | 0,85  | 2,94          | 0,91  |
| Bi       | 1,10         | 0,20  | 1,08          | 0,20  |

Para o Lote 2, a Figura 97 ilustra os mapas químicos da amostra nova e da amostra Am-02 envelhecida. Já a Tabela 9 apresenta os resultados comparativos entre essas duas amostras.

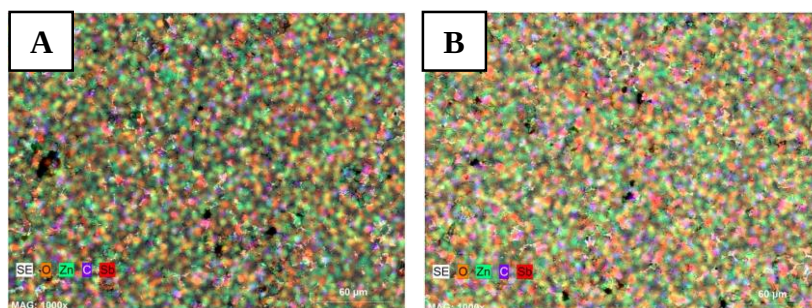


Figura 97. Mapa elementar da amostra nova (A) e amostra Am-02 envelhecida (B) do Lote 2.

Tabela 9. Comparação de dados do EDS entre a amostra nova e envelhecida do Lote 2.

| Elemento | Amostra nova |       | Amostra Am-02 |       |
|----------|--------------|-------|---------------|-------|
|          | wt. %        | at. % | wt. %         | at. % |
| O        | 17,83        | 42,07 | 18,38         | 42,13 |
| Zn       | 73,85        | 42,63 | 75,03         | 42,07 |
| C        | 4,61         | 14,48 | 4,89          | 14,92 |
| Sb       | 2,66         | 0,82  | 2,94          | 0,89  |

Por fim, para o Lote 3, a Figura 98 ilustra os mapas químicos da amostra nova e das amostras Am-02 e Am-03 envelhecidas, enquanto a Tabela 10 apresenta os resultados comparativos entre essas amostras.

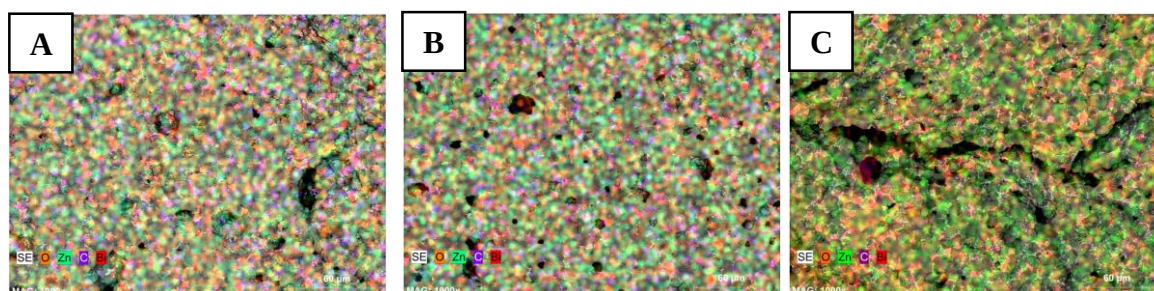


Figura 98. Mapa elementar da amostra nova (A), amostra Am-02 envelhecida (B) e amostra Am-03 envelhecida (C) do Lote 3.

Tabela 10. Comparação de dados do EDS entre a amostra nova e envelhecida do Lote 3.

| Elemento | Amostra nova |       | Amostra Am-02 |       | Amostra Am-03 |       |
|----------|--------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
|          | wt. %        | at. % | wt. %         | at. % | wt. %         | at. % |
| O        | 19,73        | 43,51 | 20,16         | 44,11 | 18,79         | 41,08 |
| Zn       | 78,43        | 42,32 | 75,29         | 40,31 | 73,11         | 39,11 |
| C        | 4,72         | 13,87 | 5,03          | 14,66 | 6,69          | 19,49 |
| Bi       | 1,74         | 0,29  | 1,65          | 0,28  | 1,92          | 0,32  |

A partir dos resultados apresentados para cada lote, verifica-se que as amostras novas e envelhecidas apresentaram composições químicas semelhantes, de modo que não houve alterações significativas após o envelhecimento. Os elementos identificados nos ensaios estão de acordo com a literatura, dado que se observou predominância de Zn e O, concentração mássica na ordem de 4% de C e o aparecimento de Sb e Bi.

Contudo, observam-se nos lotes 2 e 3 pequenas variações nas porcentagens mássicas dos elementos Zn e O entre as amostras novas e envelhecidas. Considerando a ausência de modificações composicionais expressivas associadas ao envelhecimento, essas diferenças sugerem uma possível falta de uniformidade na distribuição dos constituintes durante o processo de fabricação.

Dessa forma, os resultados indicam que o envelhecimento por impulsos de corrente não alterou de maneira relevante a composição química global dos varistores. Em contrapartida, foram observadas modificações mais evidentes nas análises microestruturais, sugerindo que os mecanismos de degradação atuaram predominantemente sobre a microestrutura do material, e não sobre sua composição química.

#### 5.4.4. DRX

Neste ensaio, buscou-se avaliar possíveis modificações nas fases cristalinas e no comportamento estrutural do material dos para-raios, por meio de comparações entre as amostras nova e envelhecida de cada lote.

No Lote 1, os difratogramas da amostra nova e da amostra Am-03 envelhecida, exibidos na Figura 99, apresentaram semelhança, visto que os principais picos cristalinos associados ao ZnO não tiveram deslocamentos entre si. Porém, foi observado aumento da intensidade de alguns picos na amostra envelhecida, como pode ser visto na região próxima a  $36^\circ$ , o que pode indicar possíveis alterações localizadas na organização cristalina do material.

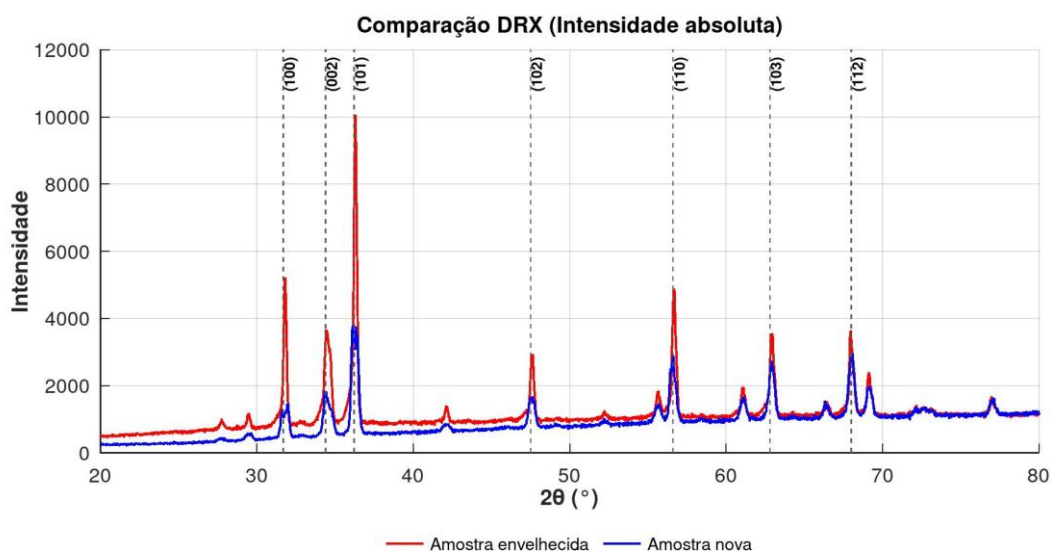


Figura 99. Resultado do ensaio de DRX da amostra nova (azul) e da amostra Am-03 envelhecida (vermelho) do Lote 1.

Já para o Lote 2, os resultados da amostra nova e da amostra Am-02 envelhecida, dispostos na Figura 100, apresentaram comportamento semelhante, dado que as duas amostras mantiveram os principais picos característicos do ZnO. Além disso, não foram observadas alterações nas posições e nas intensidades dos picos da amostra envelhecida em comparação à amostra nova, indicando que o processo de envelhecimento não promoveu modificações significativas na estrutura cristalina do material.

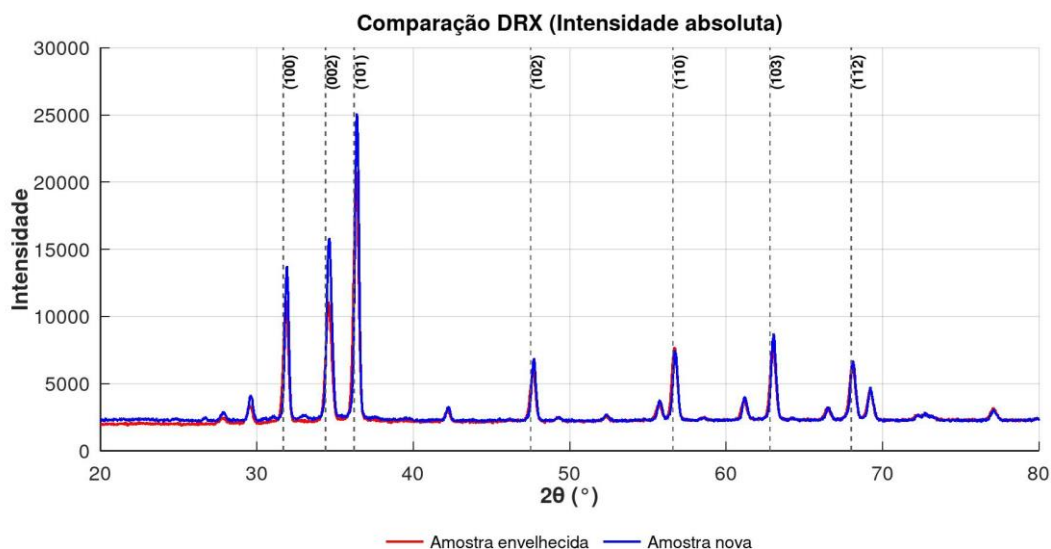


Figura 100. Resultado do ensaio de DRX da amostra nova (azul) e da amostra Am-02 envelhecida (vermelho) do Lote 2.

No Lote 3, por sua vez, já foram observadas algumas diferenças nos resultados entre as amostras envelhecidas e a amostra nova, conforme visualizadas na Figura 101. Enquanto a amostra Am-02 envelhecida manteve o comportamento mais próximo ao da amostra nova, a amostra Am-03 envelhecida apresentou redução das intensidades dos picos de difração. Essa situação pode indicar que o processo de envelhecimento dessa amostra exerceu maior influência na organização estrutural do material.

Apesar da diferença de resultado de DRX observada no Lote 3, nota-se que o processo de envelhecimento provocado pelos impulsos de corrente não promoveu mudanças significativas nas fases cristalinas predominantes do material.

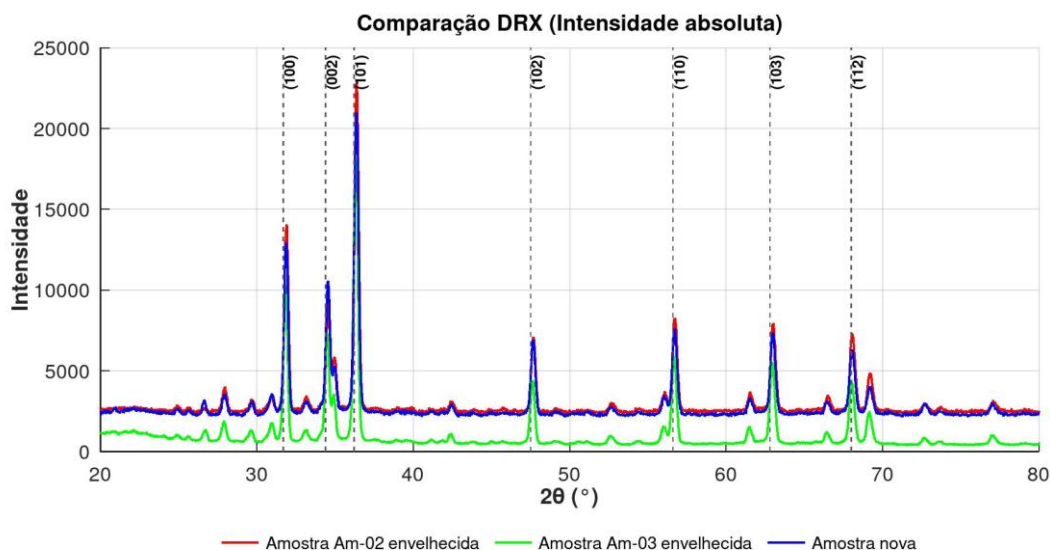


Figura 101. Resultado do ensaio de DRX da amostra nova (azul), da amostra Am-02 envelhecida (vermelho) e da amostra Am-03 envelhecida (verde) do Lote 3.

#### 5.4.5. DSC

Para os ensaios de DSC das amostras de cada lote, foram avaliadas possíveis alterações no comportamento térmico dos materiais após o processo de envelhecimento. Nesse sentido, os resultados das amostras ensaiadas do Lote 1 são apresentados na Figura 102.

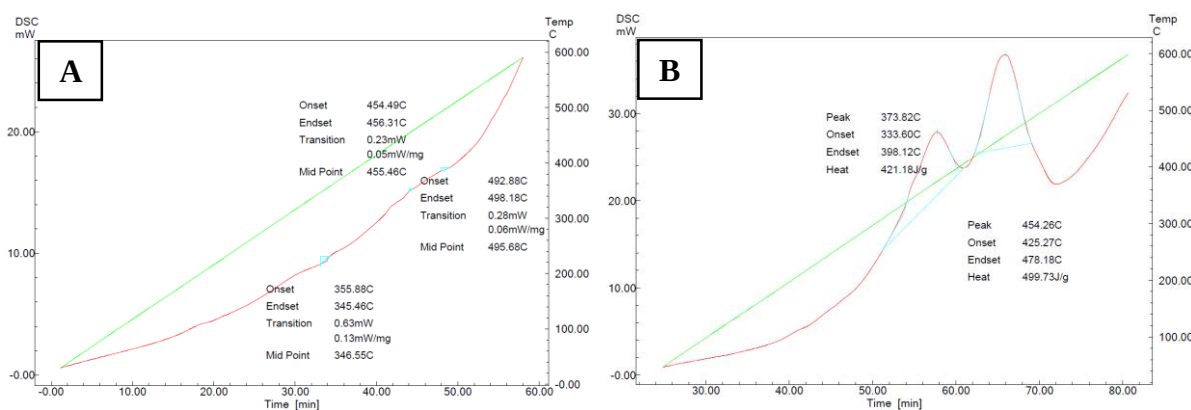


Figura 102. Resultado do ensaio de DSC da amostra nova (A) e da amostra Am-03 envelhecida (B) do Lote 1.

Os dados obtidos pelo ensaio de DSC para o Lote 1 mostram que a amostra nova apresentou transições térmicas imperceptíveis, enquanto a amostra Am-03 envelhecida apresentou eventos térmicos relevantes, principalmente nas regiões de 373,83 °C e 454,26 °C. Além disso, a amostra envelhecida Am-03 apresentou valores elevados de entalpia, 421,18 J/g e 499,73 J/g, o que indica aumento significativo da energia envolvida nos eventos térmicos após o processo de envelhecimento.

No caso do Lote 2, observou-se, a partir da Figura 103, que os eventos térmicos de ambas as amostras foram menos intensos, de modo que as entalpias associadas à amostra nova

ficaram abaixo de 15 J/g, enquanto as da amostra Am-02 envelhecida ficaram próximas de zero. Esse comportamento sugere que o processo de envelhecimento exerceu influência limitada sobre as respostas térmicas do material.

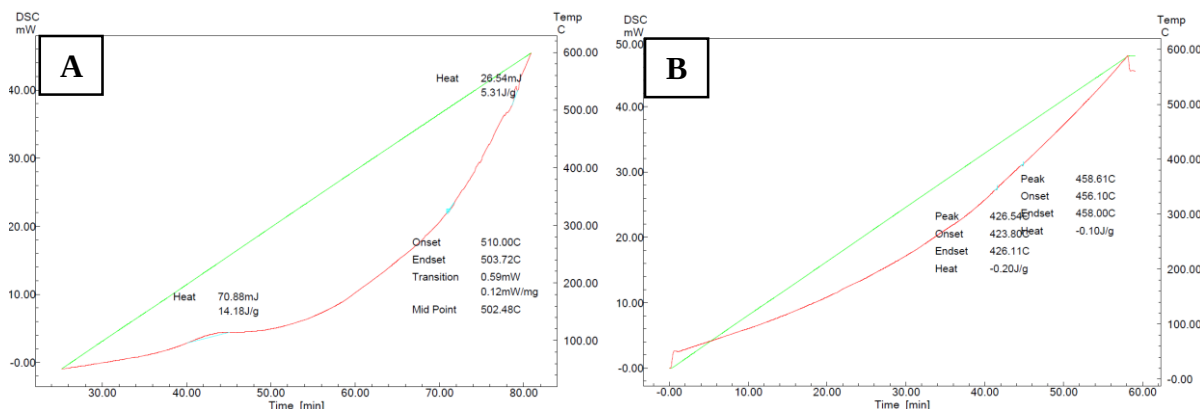


Figura 103. Resultado do ensaio de DSC da amostra nova (A) e da amostra Am-02 envelhecida (B) do Lote 2.

Para o Lote 3, os resultados das amostras são exibidos na Figura 104.

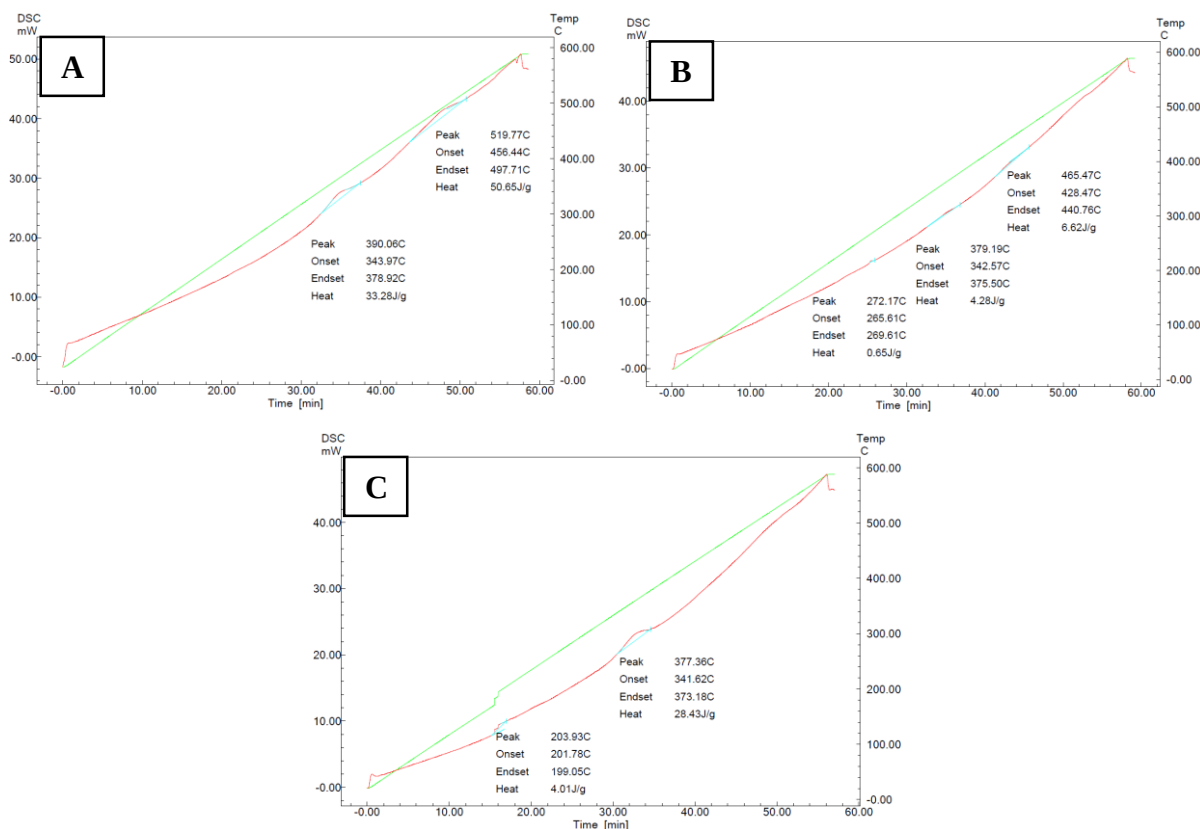


Figura 104. Resultados do ensaio de DSC das amostras nova (A), Am-02 envelhecida (B) e Am-03 envelhecida (C) do Lote 3.

A partir da Figura 104, observa-se que a amostra nova apresentou dois eventos térmicos, nas regiões de 390,06 °C e de 519,77 °C, associados, respectivamente, a entalpias de 33,28 J/g e de 50,65 J/g. Todavia, nas amostras Am-02 e Am-03 envelhecidas, foram identificadas

mudanças nesse comportamento térmico, uma vez que surgiram eventos em temperaturas mais baixas.

Enquanto na amostra Am-02 foi identificado um evento em 272,17 °C, na amostra Am-03 surgiu um evento em 209,93 °C, de modo que, em ambas as peças envelhecidas, a energia envolvida nos processos térmicos se reduziu.

Considerando que esse comportamento foi semelhante nas duas amostras envelhecidas, nota-se que os impulsos de corrente podem ter influenciado a presença de fases secundárias que se degradam a uma temperatura mais baixa, visto que o ZnO possui elevada estabilidade térmica, com ponto de fusão de 1975 °C [78]. Além disso, esse resultado corrobora o observado no DRX para esse lote.

#### 5.4.6. TGA

Neste ensaio, o objetivo foi avaliar possíveis variações de massa e alterações na estabilidade térmica das amostras envelhecidas após serem submetidas a impulsos de corrente.

Posto isso, os resultados dos ensaios de TGA, exibidos na Figura 105, mostram que a amostra nova apresentou perda de massa inferior a 1 mg até 359,09 °C. Já a amostra Am-03 envelhecida apresentou dois eventos de perda de massa, nas regiões de 318,57 °C e 779,94 °C, resultando em uma diminuição de aproximadamente 2 mg. Esse comportamento indica instabilidade térmica após o processo de envelhecimento da amostra Am-03.

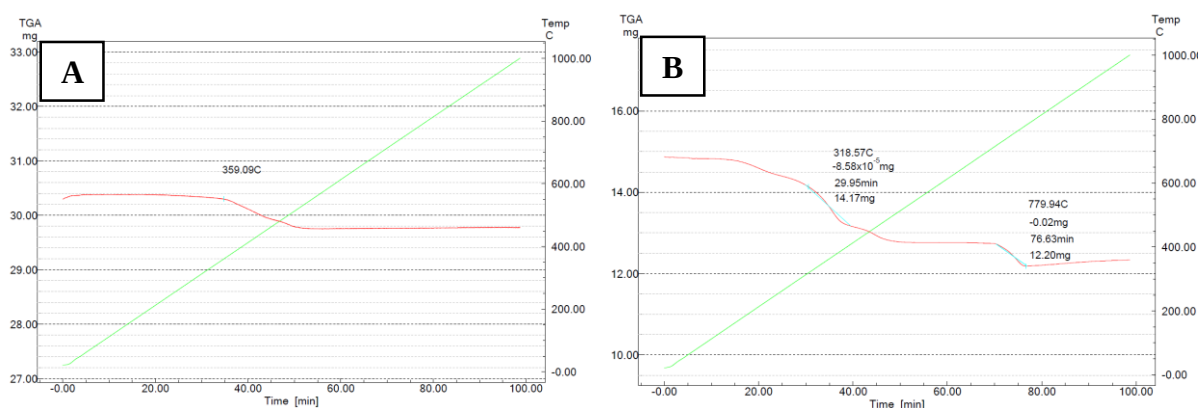


Figura 105. Resultados do ensaio de TGA das amostras nova (A) e envelhecida (Am-03) do Lote 1 (B).

Os resultados do Lote 2, por sua vez, apresentados na Figura 106, mostram que tanto a amostra nova quanto a Am-02 envelhecida não apresentaram perdas de massa significativas. Ademais, seus gráficos indicam estabilidade durante o aquecimento.

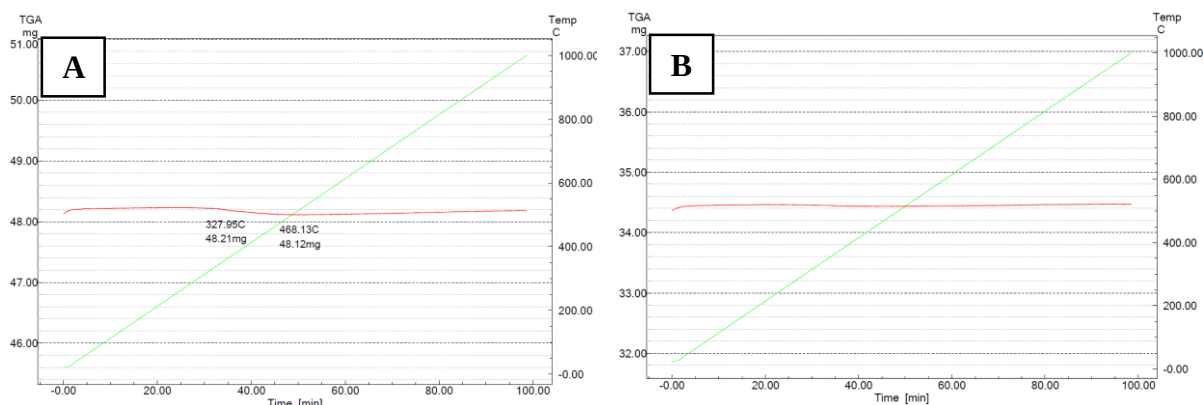


Figura 106. Resultados do ensaio de TGA das amostras nova (A) e envelhecida (Am-02) do Lote 2 (B).

Já os resultados do Lote 3, ilustrados na Figura 107, indicam que as curvas permaneceram relativamente estáveis, pois as três amostras não apresentaram perdas substanciais de massa, como no Lote 1.

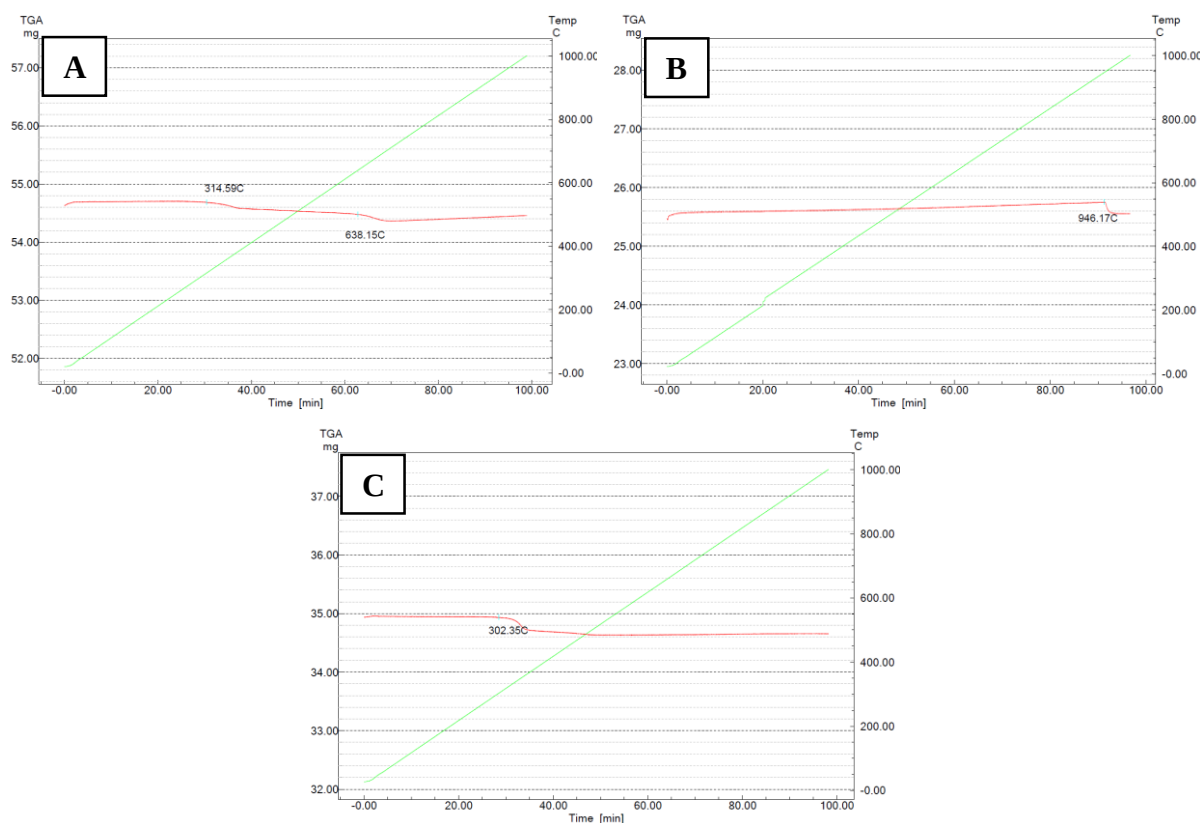


Figura 107. Resultados do ensaio de TGA das amostras nova (A), Am-02 envelhecida (B) e Am-03 envelhecida (C) do Lote 3.

Devido ao valor da estabilidade térmica do ZnO, as variações de massa observadas nos resultados dos três lotes provavelmente estão associadas às fases secundárias, às regiões intergranulares ou a resíduos.

## 5.5. Comparação de Resultados

A partir dos resultados discutidos nesta seção, observa-se concordância entre os ensaios de corrente de fuga, as medições de DP e as análises microestruturais realizadas nas amostras avaliadas.

As medições de DP evidenciaram sinais do fenômeno ao final do processo de envelhecimento de algumas amostras dos três lotes ensaiados, que também apresentaram mudanças relacionadas a esse evento durante o monitoramento elétrico, a partir da componente resistiva. Dessa forma, observa-se uma associação entre o comportamento da atividade elétrica e o avanço do processo de degradação.

Além disso, os parâmetros derivados da corrente de fuga apresentaram alterações progressivas durante o envelhecimento das amostras, em especial o terceiro harmônico e a potência dissipada, o que indica um aumento da componente resistiva e das perdas internas do dispositivo.

Já os ensaios microestruturais mostraram diferenças entre as amostras novas e envelhecidas e entre os lotes avaliados, principalmente quanto à porosidade. Nesse sentido, verificou-se que os lotes com maiores índices de porosidade apresentam menor suportabilidade a impulsos de corrente e maior propensão à ocorrência de falhas. Assim, os resultados mostraram que as características microestruturais podem influenciar diretamente o desempenho elétrico dos para-raios.

Por fim, observou-se que nem todos os parâmetros apresentaram a mesma sensibilidade ao processo de envelhecimento. Por exemplo, as medições de DP mostraram-se eficazes para indicar estágios mais avançados da degradação, porém apresentaram menor capacidade de identificação precoce em comparação com os parâmetros derivados da corrente de fuga. Em contraste, o terceiro harmônico resistivo e a potência dissipada apresentaram alterações progressivas ao longo dos ensaios, destacando-se como indicadores mais promissores para o acompanhamento da condição operacional dos para-raios.

Desse modo, os resultados obtidos mostram que o monitoramento desses parâmetros pode contribuir para futuras metodologias de diagnóstico e manutenção, auxiliando fabricantes e concessionárias na identificação de dispositivos com maior propensão à falha e na tomada de decisão quanto à substituição ou ao acompanhamento desses equipamentos em serviço.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar parâmetros elétricos e microestruturais associados ao envelhecimento de para-raios de distribuição submetidos a impulsos de corrente, a fim de investigar a sensibilidade desses parâmetros como indicadores do processo de degradação dos dispositivos.

Como resultado, foi possível acompanhar a evolução da degradação das amostras por meio de medições de corrente de fuga, de descargas parciais e de análises microestruturais. Nesse sentido, verificou-se que os impulsos de corrente promoveram alterações elétricas e estruturais nos dispositivos, evidenciando diferentes níveis de degradação entre as amostras.

As análises realizadas mostraram que os parâmetros derivados da corrente de fuga apresentaram maior sensibilidade ao envelhecimento das amostras. Em destaque, a potência dissipada e o terceiro harmônico destacaram-se como os indicadores mais promissores para o monitoramento da degradação. Posto isso, a análise de correlação de Pearson evidenciou forte associação entre os parâmetros harmônicos da componente resistiva da corrente de fuga, o que, por sua vez, confirmou a coerência entre os diferentes indicadores utilizados no acompanhamento da degradação.

Apesar das análises de DP serem realizadas com a mesma periodicidade que as análises da corrente de fuga, não foram encontrados sinais de DP em todas as amostras, mesmo estas apresentando indícios de degradação. Além disso, nas amostras Am-02 e Am-03 do Lote 1 e Am-01 do Lote 3, esses sinais só foram detectados ao final do processo de envelhecimento, o que caracteriza esse método como menos sensível do que os parâmetros derivados da corrente de fuga.

Dessa forma, a medição de descargas parciais e os ensaios microestruturais complementaram os resultados elétricos obtidos por meio da corrente de fuga. As descargas parciais foram detectadas apenas em parte das amostras e em estágios avançados do envelhecimento, indicando condições mais severas de degradação. Por sua vez, as análises microestruturais realizadas em amostras selecionadas evidenciaram alterações morfológicas e variações de porosidade associadas ao processo degradativo. Em conjunto, essas técnicas contribuíram para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos de envelhecimento dos para-raios.

Nesse sentido, conclui-se que a utilização conjunta de técnicas pode constituir uma abordagem eficaz para a avaliação do envelhecimento de para-raios de distribuição submetidos

a impulsos de corrente, corroborando o desenvolvimento de metodologias de monitoramento economicamente viáveis desses dispositivos e a confiabilidade do sistema.

Além disso, os resultados obtidos indicam que a metodologia empregada possui potencial para aplicação em estudos futuros envolvendo para-raios de subestação. Considerando a elevada criticidade desses equipamentos para a operação do sistema elétrico, bem como os custos associados à sua substituição e às consequências de eventuais falhas, o monitoramento de sua condição operacional assume papel fundamental. Dessa forma, os parâmetros identificados neste trabalho podem servir como subsídio para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento e diagnóstico aplicáveis a equipamentos de maior complexidade e relevância operacional.

Adicionalmente, as análises microestruturais realizadas demonstraram potencial para auxiliar na investigação dos mecanismos de degradação dos varistores, de modo a fornecer subsídios para estudos relacionados ao desenvolvimento, à avaliação e à otimização das características construtivas desses dispositivos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se utilizar novos indicadores de degradação, obtidos por meio de técnicas não destrutivas, como tomografia e termografia, a fim de compreender como a degradação afeta o interior do para-raios completo. Ademais, recomenda-se ensaiar classes diferentes de para-raios ou submetê-los a diferentes intensidades de impulso, a fim de avaliar as diferenças observadas. Essas investigações poderão ampliar o entendimento dos mecanismos de degradação e contribuir para o aprimoramento das técnicas de monitoramento de para-raios.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. O. Frontin, “Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hiarquização de Inovações Tecnológicas,” Goya Editora LTDA, Brasília, 2013.
- [2] M. J. A. Maia, E. G. da Costa, E. T. W. Neto e R. T. de Souza, “Monitoramento da Degradação de Para-raios de Óxido de Zinco (ZnO),” em *III CITENEL*, 2015.
- [3] H. P. Amorim Júnior, A. T. Carvalho, T. B. Rodrigues, J. A. P. Rodrigues, H. B. Oliveira e J. B. Dias, *Avaliação de Para-raios no Campo e no Laboratório por meio das Descargas Parciais utilizando TC de Alta Frequência*, Goiânia: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2012.
- [4] B. Ranjbar, A. Darvishi, R. Dashti e H. R. Shaker, “A Survey of Diagnostic and Condition Monitoring of Metal Oxide Surge Arrester in the Power Distribution Network,” *Energies*, vol. 15, nº 21, 2022.
- [5] T. G. Zacarias e W. C. Sant'Ana, “A Bibliometric and Comprehensive Review on Condition Monitoring of Metal Oxide Surge Arresters,” MDPI, 2023.
- [6] K. Wójcik, M. Olesz, L. S. Litzbarski, S. Wojtas, M. J. Winiarski e D. Jaworski, “A Comprehensive Study on the Quality of Commercially Available Medium Voltage Surge Arresters,” *IEEE*, pp. 2169-3536, 2026.
- [7] ABNT, “ABNT NBR IEC 60270 - Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão - Medição de Descargas Parciais”, Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- [8] ABNT, *ABNT NBR 16050 - Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada.*, ABNT, 2012.
- [9] ABNT, *ABNT NBR IEC 60060-1 - Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio.*
- [10] A. Haddad e D. Warne, *Advances in High Voltage Engineering*, London: The Institution of Engineering and Technology - IET, 2007.

- [11] T. A. Nogueira, “Efeitos da Temperatura de Operação no Envelhecimento Artificial de Varistores a Óxido de Zinco por Impulsos de Alta Corrente de Curta Duração,” Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, 2017.
- [12] N. A. A. Latiff, H. A. Illias, A. H. A. Bakar e S. Z. A. Dabbak, “Measurement and Modelling of Leakage Current Behaviour in ZnO Surge Arresters under Various Applied Voltage Amplitudes and Pollution Conditions,” *Energies*, vol. 11, nº 4, 2018.
- [13] M. L. B. Martinez, “Pára-raios para sistemas de média tensão características técnicas e aplicação a sistemas de potência,” Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, 1992.
- [14] SIEMENS, “Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems,” Siemens AG, Berlim, 2011.
- [15] M. Matsuoka, “Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 10, nº 6, pp. 736-746, 1971.
- [16] E. T. W. Neto, E. G. da Costa, M. J. A. Maia, T. C. L. Galindo e A. H. S. Costa, “Electro-thermal simulation of ZnO arresters for diagnosis using thermal analysis,” em *2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (IEEE Cat. No. 04EX956)*, São Paulo, Brazil, 2004.
- [17] J. M. Filho, “Manual de Equipamentos Elétricos - Terceira Edição,” LTC, Rio de Janeiro , 2005.
- [18] Bernhard Richter e et al, Metal Oxide (MO) Surge Arresters-Stresses and Test procedures., CIGRE, 2013.
- [19] Y. Tagami e N. Toda, “Latest Technologies for Surge Arresters,” *MEIDENSHA CORPORATION*, vol. 174, nº 3, pp. 17-20, 2018.
- [20] Cigré, Metal Oxide Arresters in AC Systems, WG 33.06: Cigre, 1991.

- [21] S. F. Elzoghby, M. E. Ibrahim, A. M. Abd-Elhady e M. A. Izzularab, “A New Criterion for Condition Assessment of Metal Oxide Surge Arresters,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, nº 23, pp. 42802-42811, 2025.
- [22] E. Sakshaug, J. S. Kresge, D. Mark e G. G. Karady, “Contamination & Hot Wash Performance of Zinc Oxide Station Arresters,” *IEEE*, pp. 1095-1104, 1982.
- [23] K. Eda, “Zinc oxide varistors,” *IEEE*, pp. 28-30, 1989.
- [24] K. L. Chrzan, “Internal partial discharges test for metal oxide surge arresters,” *Ukrainian Journal*, pp. 93-96., 2002.
- [25] Z. Abdul-Malek, A. Khavari, W. C.L, M. Moradi e A. Naderipour, “A Review of Modeling Ageing Behavior and Condition Monitoring of Zinc Oxide Surge Arrester,” em *IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2015.
- [26] ABB Switzerland Ltd., “Overvoltage protection metal oxide surge arresters in medium voltage systems,” 2011.
- [27] J. C. Montenegro e J. L. Ramirez, “Degradation of zinc oxide varistors,” em *Proceedings of First International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, Caracas, Venezuela, 1995.
- [28] A. G. Videira, “Desenvolvimento de subsídios para aplicação em testes de avaliação de para-raios de ZnO,” Dissertação de mestrado. UFSC, Florianópolis, 2011.
- [29] S. F. Elzoghby, M. E. Ibrahim, A. Abd-Elhady e M. A. Izzularab, “A Proposed Resistive and Capacitive Current Decoupling Method for Surge Arresters,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, nº 12, pp. 21734-21743, 2025.
- [30] J. Silveira, “Modelagem e análise de varistores de óxido metálico de Zinco,” Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2009.

- [31] T. A. Nogueira, “Efeito das Correntes de Impulso de Curta Duração na Degradação e na Capacidade de Absorção de Energia de Varistores a ZnO,” UNIFEI, Itajubá, 2023.
- [32] C. Salles, M. L. B. Martinez e Á. A. A. de Queiroz, “Ageing of Metal Oxide Varistors due to Surges,” em *International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*, Fortaleza, Ceará, 2011.
- [33] IEC TR 60071- 4, Insulation co-ordination - Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks, 2004.
- [34] N. S. Othman, M. N. K. Rohani, W. A. Mustafa, C. L. Wooi, A. S. Rosmi, N. F. M. Shakur, R. Juliangga, W. Khairunizam, I. Zunaidi, Z. M. Razlan e A. B. Shahriman, “An Overview on Overvoltage Phenomena in Power Systems,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 557, 2019.
- [35] J. D. M. Guisao, C. R. R. Ceballos e E. P. González, “Experimental Characterization of 15 kV Surge Arresters Aging Subjected to Current Impulses,” em *2025 International Symposium on Lightning Protection (XVIII SIPDA)*, Thessaloniki, Greece, 2025.
- [36] G. Paoletti e A. Golubev, “Partial discharge theory and applications to electrical systems,” IEEE, 1999.
- [37] T. B. Rodrigues, “Detecção, separação e classificação de sinais de descargas parciais em isolamentos de alta tensão,” Tese. PUC-Rio., 2019.
- [38] G. A. Hussain, W. Hassan, F. Mahmood, M. Shafiq, H. Rehman e J. A. Kay, “Review on Partial Discharge Diagnostic Techniques for High Voltage Equipment in Power Systems,” IEEE, 2023.
- [39] M. Yaacob, M. Alsaedi, J. Rashed, A. Dakhil e S. Atyah, “Review on Partial Discharge Detection Techniques Related to High Voltage Power Equipment Using Different Sensors,” *Photonic Sensors*, 2014, 4(4): 325–337., 2014.

- [40] J. H. Mason, *Enhancing the Significance of PD Measurements*, 5 ed., vol. 2, Harlow: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, pp. 876-888.
- [41] T. Sandri e V. Warren, "Partial Discharge Testing of Electrical Equipment: Busting the Myths and Implementing Existing Technologies and Methods," PowerTest Conference, 2014.
- [42] H. Knobloch, R. Gohler, W. Kuhne, K. Reichelt, H. B. Solbach, R. Bruchhaus e W. Holubarsch, *Influence of the Surrounding Medium and Service Behavior os Metal Oxide Resistors for High Voltage Arresters*, 2 ed., vol. 6, 1991, pp. 680-687.
- [43] J. He, C. Cheng e J. Hu, "Electrical degradation of doubre-Schottky barrier in ZnO varistors," *AIP Advances*, vol. 6, nº 3, pp. 1-17, 2016.
- [44] R. C. Álvares, "Diagnóstico de Falhas em Para-raios Etilizando Termografia," Dissertação de Mestrado. UFMG., Belo Horizonte, 2008.
- [45] M. A. Alim, S. Li, F. Liu e P. Cheng, "Electrical barriers in the ZnO varistor grain boundaries," *phys. stat. sol.*, vol. 203, nº 2, pp. 410-427, 2006.
- [46] H. Yuwei, F. Zhangcai e C. Jian, "Investigation of the Effects of Milti-waveform Milti-pulse Impulse Currents on MOV for Class I SPD Through Operating Duty Tests," em *International Conference on Lightning Protection*, Estoril, Portugal, 2016.
- [47] Y. Zheng, T. Maegawa, Y. Sato e S. Yoshikato, "High performace Bi-Co-Mn-Si-B-doped ZnO varistors with wide ranging breakdown voltage and high resistance to electrical degradation," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 44, nº 14, pp. 1-7, 2024.
- [48] G. K. S, A review of Zinc Oxide Varistors for Surge Arrester, IEEE, 2018.
- [49] M. Akbar e M. Ahmad, "Failure study of metal-oxide surge arresters," *Electric Power Systems Research*, vol. 50, nº 2, pp. 79-82, 1999.

- [50] C. A. Christodoulou, M. A. Avgerinos, L. Ekonomou, I. F. Gonos e I. A. Stathopoulos, "Measurement of the Resistive Leakage Current in Surge Arresters under Artificial Rain Test and Impulse Voltage Subjection," *IET Science*, vol. 3, n° 3, pp. 256-262, 2009.
- [51] T. Zhao, Q. Li e J. Qian, "Investigation on digital algorithm for on-line monitoring and diagnostics of metal oxide surge arrester based on an accurate model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n° 2, pp. 751-756, 2005.
- [52] G. R. S. Lira, E. G. Costa e T. V. Ferreira, "Metal-oxide surge arrester monitoring and diagnosis by self-organizing maps," *Electric Power Systems Research*, pp. 315-321, 2014.
- [53] NEMA, "US G 107-2021 - Arrester Condition Monitoring Guide," National Electrical Manufacturers Association - NEMA, 2021.
- [54] T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors," *Journal os the American Ceramic Society*, vol. 73, n° 7, pp. 1817-1840, 1990.
- [55] K. Eda, "Conduction Mechanism of Non-Ohmic Zinc Oxide Ceramics," *Journal of Applied Physics*, vol. 49, n° 5, pp. 2964-2972, 1978.
- [56] D. C. Montgomery e G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th, NJ, USA: Hoboken, 2018.
- [57] M. A. A. Romano, A. M. Morais, M. V. A. Nunes, K. Maresch, L. F. F. Gutierrez, G. Cardoso Jr., A. L. Oliveira, E. F. Martins, C. H. Correa e H. C. Fontoura, "A Novel Method for Online Diagnostic Analysis of Partial Discharge in Instrument Transformers and Surge Arresters from the Correlation of HFCT and IEC Methods," MDPI, 2024.
- [58] HAEFELY, "DDX 9121b - Datasheet," 2021. [Online]. Available: <https://www.pfiffner-group.com>. [Acesso em 27 março 2026].
- [59] IEEE, IEEE C62.11-2020 - IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV), 2020.

- [60] F. G. K. Guarda, A. L. Oliveira, J. V. M. B. Castro, A. D. N. Quatrin, K. Maresch, G. Dhein, G. C. Jr., C. H. Corrêa e F. E. Martins, “Avaliação de métodos para detecção de descargas parciais em transformadores,” em *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2022*, 2022.
- [61] H. R. P. M. de Oliveira, F. Pelizan, I. G. Campos Jr., C. Lefort, C. de Salles, M. L. B. Martinez e R. G. de Oliveira Jr., “Evaluation of the Insulation of 15 kV - 25 kV Feeders and Procedures for Substitution of Damaged Units,” em *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006.
- [62] I. F. Carvalho, “Identificação de fontes de descargas parciais por atributos extraídos da envoltória do sinal,” Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, 2024.
- [63] Martec Asset Solution, “Model 250 Parabolic Pinpointer,” 2026. [Online]. Available: <https://www.martecassetsolutions.com.au/product/model-250-parabolic-pinpointer/>. [Acesso em 27 março 2026].
- [64] IEC 60099-5, “Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations,” 2018.
- [65] M. Khodsuz e M. Mirzaie, “Evaluation of ultraviolet ageing, pollution and varistor degradation effects on harmonic contents of surge arrester leakage current,” *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 9, nº 8, pp. 979 - 986, 2015.
- [66] Novizon e Z. Abdul-Malek, “Electrical and Temperature Correlation to Monitor Fault Condition of ZnO Surge Arrester,” em *2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, 2017.
- [67] G. R. S. Lira e E. G. Costa, “MOSA Monitoring Technique Based on Analysis of Total Leakage Current,” *IEEE Transactions on Power Deliver*, vol. 28, nº 2, pp. 1057-1062, 2013.
- [68] International Electrotechnical Commission, “IEC 60060-1 - High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements,” 2010.

- [69] A. P. S. Meliopoulos, "Lightning and Overvoltage Protection," *Standard handbook of electrical engineering*, nº 15, 19 January 2006.
- [70] ABNT NBR 5419-1, "Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 1: princípios gerais," ABNT, 2015.
- [71] C. G. Shirley e W. M. Paulson , "The pulse-degradation characteristic of ZnO varistors," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, nº 9, pp. 5782-5789, 1979.
- [72] A. Vicaud, "A. C. Voltage Ageing of Zinc - Oxide Ceramics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, nº 2, pp. 49-58, 1986.
- [73] M. B. Kourdi, A. Bui, A. Loubiere e A. Khedim, "Behaviour of metal-oxide-based varistors subjected to partial discharges in air," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 25, nº 3, pp. 549-551, 1992.
- [74] J. G. d. M. Furtado, L. A. Saléh, E. T. Serra, G. S. G. Oliveira e M. C. d. S. Nóbrega, "Microstructural Evaluation of Rare-Earth-Zinc Oxide-Based Varistor Ceramics," *SciELO*, vol. 8, nº 4, pp. 425-429, 2005.
- [75] M. Chaari, A. Motoussi e Z. Fakhfakh, "Structural and Dielectric Properties of Sintered Zinc-Oxide Bulk Ceramic," *Materials Sciences and Application*, vol. 2, pp. 765-770, 2011.
- [76] K. Lukas e P. K. LeMaire, "Differential Scanning Calorimetry: Fundamental Overview," *Resonance*, vol. 14, pp. 807-817, 2009.
- [77] A. Latf, "Elaboration of pure and doped ZnO powders with sol gel method," University Mohamed Khider of Biskra. Doctoral thesis., Biskra - Algérie, 2024.
- [78] M. Kahouli, A. Barhoumi, A. Bouzid, A. Al-Hajry e S. Guermazi, "Structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by direct precipitation method," *Superlattices and Microstructures*, vol. 85, pp. 7-23, 2015.

- [79] D. A. d. Silva, “Metodologia de análise qualitativa em para-raios poliméricos sujeitos à umidade interna,” UNICAMP. Tese de doutorado., Campinas, 2016.
- [80] M. L. Arefin, “In-situ Measurements of the Liquid-Phase Sintering of Zinc Oxide,” Universitaet Bayreuth (Germany), 2009.
- [81] J. M. Rami, C. D. Patel, C. M. Patel e M. V. Patel, “Thermogravimetric analysis (TGA) of some synthesized metal oxide nanoparticles,” *Materialstoday: Proceedings*, vol. 43, nº 1, pp. 655-659, 2021.
- [82] K. K. Taha, M. O. M'Hamed e H. Idriss, “Mechanical Fabrication and Characterization of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles,” *Journal of Ovonic Research*, vol. 11, nº 6, pp. 271-276, Noverber - December 2015.
- [83] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, P. Echlin, D. C. Joy, C. E. Lyman, E. Lifshin, L. Sawyer e J. R. Michael, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, New York: Springer Science, 2003.
- [84] Q. Zhang, S. Wang, X. Dong, M. Liu, Q. Ou e F. Lv, “Research of ZnO Arrester Deterioration Mechanism Based on Electrical Performance and Micro Material Test,” *Eletronics*, vol. 10, nº 21, pp. 1-14, 2021.
- [85] J. Aslam, C. Verma e C. M. Hussain, *Electrochemical and analytical techniques for sutainable corrosion monitoring*, ELSEVIER, 2023.
- [86] K. P. Mardira , T. K. Saha e R. A. Sutton, “Investigation of diagnostic techniques for metal oxide surge arresters,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, nº 1, pp. 50-59, 2005.
- [87] P. Mabonda e P. Bokoro, “Microstructure observation of zinc oxide exposed to thermal and ac field stresses,” em *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Milan, Italy, 2017.

- [88] E. e. a. Gulski, "Guidelines for Partial Discharge Detection Using Conventional (IEC60270) and Unconventional Methods," CIGRÉ Technical Brochure 654, 2016.