UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Thiago Arantes Nogueira

Efeito das Correntes de Impulso de Curta Duração na Degradação e na Capacidade de Absorção de Energia de Varistores a ZnO

Itajubá, Março de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Thiago Arantes Nogueira

Efeito das Correntes de Impulso de Curta Duração na Degradação e na Capacidade de Absorção de Energia de Varistores a ZnO

> Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor 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

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Thiago Arantes Nogueira

Efeito das Correntes de Impulso de Curta Duração na Degradação e na Capacidade de Absorção de Energia de Varistores a ZnO

Banca examinadora:

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto (Orientador)
Prof. Dr. Credson de Salles (Coorientador)
Prof. Dr. Aellfclêniton Mouroner Maciel Diniz
Prof. Dr. George Rossany Soares de Lira
Prof. Dr. Ivan Paulo de Faria

Agradecimentos

Agradeço aos professores Estácio Tavares Wanderley Neto e Credson de Salles pelo conhecimento compartilhado e pelas orientações durante o desenvolvimento desta tese.

Agradeço a Felipe Fernandes Pinheiro pela imensurável contribuição à execução dos ensaios elétricos deste trabalho.

Agradeço a Felipe Bersch (MAURIZIO) pelo suporte técnico.

À CAPES, pelo suporte financeiro concedido.

Por fim, agradeço a todos os colegas que de alguma forma contribuíram para esta pesquisa.

Dedicatória

A Deus, pelo dom da vida e pela possibilidade de desenvolver esta pesquisa.

À minha mãe, meu pai e minhas irmãs pelo suporte dado no decorrer deste doutorado.

À Diva, meu anjo de quatro patas, pelo apoio emocional, companhia e amor incondicional, indispensáveis para que este trabalho fosse concluído.

Aos meus amigos, que sempre estiveram dispostos a me ouvir e aconselhar quando procurados.

À memória de Manuel Luís Barreira Martinez, pelas oportunidades dadas e pelos conhecimentos passados em vida e deixados em seus trabalhos.

Resumo

Os para-raios instalado em campo está sujeito a diversos tipos de sobretensões, e os varistores que compõem sua parte ativa devem ser capazes de, não somente absorver a energia imposta por estas solicitações, mas também apresentar níveis de degradação que não comprometam seu correto funcionamento após o evento. A busca por correlações entre energia absorvida por um varistor e sua degradação motivou a investigação proposta neste trabalho, no qual varistores de diferentes fabricantes tiveram suas capacidades de absorção de energia avaliadas frente a impulsos de corrente de diferentes formas de onda com duração da ordem dos microssegundos. A avaliação do nível de degradação das amostras durante o processo de envelhecimento foi feita por meio da leitura da corrente de fuga entre as aplicações de impulso, a partir das quais foram analisadas a potência consumida, os picos resistivos de corrente e as distorções harmônicas do sinal. Os resultados apresentam uma relação direta entre a duração do impulso e o número de descargas suportadas em diferentes formas de onda de mesma energia, e indicam que o tempo submetido à sobretensão é mais crítico do que a corrente de pico para a capacidade de absorção de energia dos varistores. Entretanto, amostras submetidas a impulsos mais curtos apresentam maiores variações na corrente de fuga, fator que pode levar o para-raios à avalanche térmica em operação.

Palavras-chave: absorção de energia, corrente de fuga, degradação, impulso de corrente, para-raios, varistores a óxido de zinco.

Abstract

Installed surge arresters are subjected to different types of overvoltages, and the varistors, which are their active element, must be able to not only absorb the energy from these overvoltages, but also present degradation levels that do not compromise its functionality after the event. The lack of correlations between the energy absorbed by a varistor and its degradation motivated the investigation proposed in this research, in which varistors from different manufacturers had their energy absorption capabilities evaluated by current impulses at different waveforms with durations in the order of microseconds. The degradation level of the samples during the ageing process was evaluated through the measurement of the leakage current between impulse applications, in which the power, the resistive peaks and the harmonic distortion were analyzed. The results present a direct relation between the impulse duration and the number of discharges with the same energy withstood in different waveforms, and indicate that the time under and overvoltage is more critical to varistor ageing than the peak value of the discharged current. However, samples submitted to shorter impulses presented more intense variations on their leakage current, which can lead to a thermal runaway of the varistor in operating conditions.

Keywords: current impulse, degradation, energy absorption, leakage current, surge arrester, zinc oxide varistors.

Lista de Figuras

Figura 1. Representação da magnitude das tensões e sobretensões no SEP em relação ao
tempo de solicitação. Adaptado de [5]
Figura 2. Curva característica de um varistor ideal frente a uma sobretensão Vs.
Adaptado de [6]
Figura 3. Evolução dos dispositivos de proteção contra surtos de tensão [6]27
Figura 4. Característica de operação de um para-raios convencional a carbeto de silício
com centelhadores estáticos. Adaptado de [6]
Figura 5. Característica de operação de um para-raios convencional a carbeto de silício
com centelhadores ativos. Adaptado de [6]
Figura 6. Comparação da relação tensão x corrente dos varistores a ZnO e SiC [41]. 29
Figura 7. Características de potência consumida por um resistor a óxido metálico e de
potência dissipada pelo invólucro em função da temperatura de operação [6]30
Figura 8. Efeitos da temperatura de sinterização e da concentração de dopantes sobre as
propriedades elétricas do MOV. Adaptado de [10]
Figura 9. Variação da componente resistiva da corrente de fuga em função do tempo sob
envelhecimento a diferentes temperaturas e níveis de tensão. Adaptado de [17]32
Figura 10. Potência dissipada em função da temperatura para amostras com diferentes
níveis de degradação. Adaptado de [19]
Figura 11. TSC para amostras envelhecidas a 5 impulsos de diferentes densidades de
corrente. Adaptado de [20]
Figura 12. TSC para varistores envelhecidos à MCOV a 135 °C. Adaptado de [21]36
Figura 13. Capacidade de absorção de energia em função do tempo. Adaptado de [34].
Figura 14. Modelo para a microestrutura da cerâmica de ZnO. Adaptado de [10]40
Figura 15. Diagrama de energia antes do contato. Adaptado de [15]41
Figura 16. Diagrama de energia após o contato. Adaptado de [15]
Figura 17. Curva característica tensão x corrente de um varistor a ZnO [40]43
Figura 18. Circuito equivalente para representação de MOV. Adaptado de [52]44
Figura 19. Circuito equivalente para o MOV para diferentes frequências. Adaptado de
[62]
Figura 20. Circuito equivalente do MOV proposto por ZHAO et. al [63]46

Figura 21. Fluxograma da decomposição da corrente de fuga conforme ZHAO et. al
[63]
Figura 22. Perfuração devido à aplicação sequencial de impulsos atmosféricos em um
MOV [43]
Figura 23. VHN para MOV novo (A) e amostras degradadas a 20°C (B), 60°C (C) e
80°C(D), com nível crescente de degradação [43]57
Figura 24. Diagrama de energia após a polarização da DBS. Adaptado de [15]58
Figura 25. Envelhecimento frente a impulsos sucessivos60
Figura 26. Amostra dos fabricantes A, B e C, respectivamente61
Figura 27. Circuito para medição da corrente de fuga62
Figura 28. Eletrodos para leitura da corrente de fuga63
Figura 29. Decomposição da corrente de fuga64
Figura 30 - Gerador de impulsos de corrente exponenciais66
Figura 31. Parâmetros para determinação dos tempos de frente e cauda de impulsos de
corrente exponenciais
Figura 32. Gerador de impulsos do LAT-EFEI, vista geral68
Figura 33. Fonte de tensão AC (A), resistor limitador de corrente (B) e diodo retificador
(C)
Figura 34. Divisor capacitivo (A), TC de alta frequência (B), amostra sob ensaio (C) e
<i>gap</i> (D)69
Figura 35. Indutores para formas de onda 8/20 µs (A) e 30/75 µs (B)69
Figura 36. Copo de nylon, posição aberta70
Figura 37. Copo de nylon, posição fechada70
Figura 38. Fluxograma do tratamento dos sinais de corrente de fuga72
Figura 39. Exemplo de impulso 4/10 µs sem falha do varistor
Figura 40. Exemplo de impulso 4/10 µs com falha do varistor73
Figura 41. E _{50%} x Tempo de cauda, MAD75
Figura 42. Sinal de carbonização na superfície lateral de um varistor do Fabricante A
Figura 43. Energia x <i>N</i> _{50%} , Fabricante A77
Figura 44. Energia x N _{50%} , Fabricante B77
Figura 45. Energia x <i>N</i> _{50%} , Fabricante C77
Figura 46. Energia x $N_{50\%}$, sobreposição dos três fabricantes

Figura 47. Marcações laterais em amostras dos fabricantes A, B e C, respectivamente.
Figura 48. Tela da ferramenta Curve Fitting, do MATLAB.
Figura 49. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante A
Figura 50. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA,
fabricante A
Figura 51. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante B
Figura 52. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA,
fabricante B
Figura 53. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante C
Figura 54. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA,
fabricante C
Figura 55. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante A
Figura 56. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante A
Figura 57. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante B
Figura 58. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA,
fabricante B
Figura 59. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA,
fabricante C
Figura 60. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA,
fabricante C
Figura 61. Potência dissipada à MCOV, fabricante A87
Figura 62. Potência dissipada à MCOV, fabricante B87
Figura 63. Potência dissipada à MCOV, fabricante C87
Figura 64. Terceiro harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A88
Figura 65. Quinto harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A
Figura 66. Sétimo harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A
Figura 67. Nono harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A

Figura 68. Tercento harmonico da corrente de fuga a MCOV, fabricante B
Figura 69. Quinto harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B9
Figura 70. Sétimo harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B9
Figura 71. Nono harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B9
Figura 72. Terceiro harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C9
Figura 73. Quinto harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C9
Figura 74. Sétimo harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C9
Figura 75. Nono harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C9
Figura 76. Comparação da potência dissipada à MCOV9
Figura 77. Comparação do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga
<i>V_{REF}</i> para 0,5 mA9
 <i>V_{REF}</i> para 0,5 mA
V _{REF} para 0,5 mA
 <i>P</i>_{REF} para 0,5 mA
 <i>P</i>_{REF} para 0,5 mA. Figura 78. Comparação do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga <i>P</i>_{REF} para 1,0 mA. <i>P</i>₁ Figura 79. Comparação do 3° harmônico da corrente de fuga à MCOV. <i>P</i>₁ Figura 80. Comparação do 5° harmônico da corrente de fuga à MCOV. <i>P</i>₁ Figura 81. Comparação do 7° harmônico da corrente de fuga à MCOV. <i>P</i>₁ Figura 82. Comparação do 9° harmônico da corrente de fuga à MCOV. <i>P</i>₁ Figura 83. Exemplo de impulso na forma 4/10 µs.
 <i>P</i>_{REF} para 0,5 mA
 <i>V_{REF}</i> para 0,5 mA

Lista de Tabelas

Tabela 1. Valores de tensão de referência e resistência obtidos antes e após o processo
de envelhecimento. Adaptado de [18]
Tabela 2. Expectativa de vida dos grupos ensaiados. Adaptado de [36]38
Tabela 3. Efeitos de alguns aditivos nas propriedades elétricas dos MOVs [52]39
Tabela 4. Principais características médias dos resistores a óxido metálico [70]50
Tabela 5. Método dos acréscimos e decréscimos para impulso retangular de 540 µs.
Adaptado de [33]
Tabela 6. Dimensões médias dos varistores utilizados neste trabalho61
Tabela 7. Corrente de pico e tensão residual para impulsos a 2,45 kJ em amostras do
Fab. A
Tabela 8. E50% e desvio padrão74
Tabela 9. Coeficientes: fit <i>E</i> _{50%} . 75
Tabela 10. Número de impulsos aplicados até o encerramento dos lotes76
Tabela 11. Valor de b para cada forma de onda.79
Tabela 12. Coeficientes obtidos na aproximação das curvas de <i>E</i> x <i>N</i> 79
Tabela 13. Comparação entre k e E50%.79
Tabela 14. MAD, fabricante A, 4/10 µs110
Tabela 15. MAD, fabricante A, 8/20 µs110
Tabela 16. MAD, fabricante A, 30/75 μs110
Tabela 17. MAD, fabricante B, 4/10 µs110
Tabela 18. MAD, fabricante B, 8/20 µs110
Tabela 19. MAD, fabricante B, 30/75 μs111
Tabela 20. MAD, fabricante C, 4/10 µs111
Tabela 21. MAD, fabricante C, 8/20 µs111
Tabela 22. MAD, fabricante C, 30/75 µs111

Lista de Abreviaturas e Siglas

3D	Três dimensões.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AC	Alternating current – sinal em corrente alternada.
Al_2O_3	Óxido de alumínio.
BdS	Barreiras de Schottky.
Bi ₂ O ₃	Óxido de Bismuto (III).
CaO	Óxido de Cobalto (II).
CSV	Comma Separated Values.
DBS	Duplas Barreiras de Schottky.
DC	Direct Current – sinal em corrente contínua.
DFT	Discrete Fourrier Transform – transformada discreta de Fourrier.
EDS	<i>Energy-Dispersive Spectroscopy</i> – espectroscopia por dispersão de energia.
EFG	Nível de Fermi do grão de ZnO.
EFI	Nível de Fermi da camada intergranular.
FFT	Fast Fourrier Transform – transformada rápida de Fourrier.
FLP	Fermi Level Pinning – fixação do nível de Fermi.
Ga ₂ O ₃	Óxido de Gálio (III).
IG	Camada intergranular.
K ₂ O	Óxido de Potássio.
LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão Professor Manuel Luís Barreira Martinez.
MAD	Método dos Acréscimos e Decréscimos.
MCOV	<i>Maximum Continuous Operating Voltage</i> – máxima tensão de operação contínua.
MG	Minas Gerais.
MnO	Óxido de Manganês.
MOV	Metal Oxide Varistor – varistor a óxido metálico.
MSCM	<i>Modified Shifted Current Method</i> – método modificado da corrente deslocada.
MSES	Método de sinterização em estado sólido.
Nb ₂ O ₅	Óxido de Nióbio (B).
NBR	Norma Técnica Brasileira.

NF	Nível de Fermi.
p.u.	Por unidade.
RMS	Root Mean Square, valor eficaz.
SEP	Sistema elétrico de potência.
SiC	Carbeto de Silício.
SiO ₂	Dióxido de Silício.
SrO	Óxido de Estrôncio.
TC	Tempo de cauda.
TF	Tempo de frente.
TSC	<i>Thermaly Stimulated Current</i> – corrente termicamente estimulada.
UV	Ultravioleta.
VHN	Vickers Hardness Number – número de dureza Vickers.
ZnO	Óxido de Zinco.
ZrO_2	Dióxido de Zircônio.

Lista de Símbolos

α	Coeficiente de não-linearidade.
β	Coeficiente de proporcionalidade da forma de corrente.
γ	Coeficiente característico do varistor.
π	Constante pi.
ρ	Densidade.
σ	Desvio padrão.
σf	Tensão média mínima de ruptura frente à flexão.
μs	Microssegundo.
ω	Frequência angular.
Ω	Ohm.
%	Porcento.
°C	Graus celcius.
a	Coeficiente para ajuste de curva.
Α	Ampere.
<i>A</i> ₀ , <i>A</i> ₁	Elementos não lineares do circuito equivalente do MOV.
a_k	Coeficiente da série de Fourier.
a_l	Coeficiente térmico de expansão linear.
b	Coeficiente para ajuste de curva.
b_k	Coeficiente da série de Fourier.
С	Calor específico.
С	Capacitor.
C_S	Capacitor em série no ramo resistivo do circuito equivalente do MOV.
C_{div}	Divisor de tensão capacitivo.
C_m	Capacitância do circuito equivalente do MOV à frequência industrial.
C_n	Capacitor do estágio n do gerador de impulsos.
cos	Cosseno.
d	Coeficiente para ajuste de curva.
D	Coeficiente de difusão térmica.
dt	Derivada no tempo.
dV	Derivada da tensão.
е	Eficiência do gerador de impulso.

Ε	Energia.
E50%	Energia relativa a 50% probabilidade de falha do MOV a impulso único.
E_a	Energia aplicada sobre a amostra no MAD.
E_c	Energia carregada no banco de capacitores.
E_C	Energia da banda de condução.
E_d	Energia aplicada na descarga.
E_e	Energia específica em função da MCOV.
E_{FG}	Nível de Fermi do grão de ZnO.
E_{FI}	Nível de Fermi da camada intergranular.
El	Módulo de elasticidade.
E_V	Energia da banda de valência.
F	Farad.
fc	Fator de correção da tensão de referência.
f_N	Número de ocorrências no nível de corrente N.
8	Grama.
h	Horas.
H_p	Constante de proporcionalidade.
Н	Henry.
Ι	Corrente.
i	Corrente total no circuito equivalente do MOV.
I_0	Valor de pico da corrente de descarga.
I_1, I_2	Pontos de corrente para definição do coeficiente de não-linearidade.
I50%	Corrente de escoamento crítica.
<i>i</i> _C	Corrente no ramo capacitivo do circuito equivalente do MOV.
If(t)	Corrente de fuga para um instante no tempo.
Ifo	Corrente de fuga inicial.
I_N	Corrente nominal de escoamento do MOV.
I_P	Corrente de pico da descarga atmosférica.
i _R	Corrente no ramo resistivo do circuito equivalente do MOV.
Is	Corrente subsequente após a descarga.
Is	Soma das componentes resistiva e capacitiva da corrente.
J	Joule.

Constante de proporcionalidade.
Quiloampere.
Quilovolt.
Quilojoule.
Kelvin.
Condutividade térmica.
Múltiplo inteiro de frequência angular.
Indutâncias do circuito equivalente do MOV.
Indutância do caminho de descarga do gerador de impulsos.
Indutância de cada estágio do gerador de impulsos.
Logaritmo natural.
Metro.
Miliampere.
Milímetro.
Acréscimo de corrente de fuga devido à degradação.
Número de descargas.
Newton.
Número de impulsos que representa 50% de chance de falha.
Nanofarad.
Coeficiente da série de Fourier.

Coeficiente da série de Fourier. q_k

Energia injetada no resistor por unidade de volume. qR

Correlação cruzada. r

R Resistência.

k

kA

kV

kJ

Κ

kt

kω

L0

L1

ln

т

mА

тт

М

п Ν

 $N_{50\%}$

nF

 p_k

 L_0, L_1

 R^2 Coeficiente de correlação.

 R_{0}, R_{1} Resistências do circuito equivalente do MOV.

Resistência variável referente às DBS. **R**_{DBS}

 R_{ZnO} Resistência dos grãos de ZnO.

Segundo. S

Seno. sen

Tempo. t

Tempo de cauda. tc

tf	Tempo de frente.
t_m	Instante do valor máximo de tensão.
τ	Período do sinal aplicado no varistor.
T(t)	Temperatura instantânea do MOV.
T_0	Temperatura inicial do MOV.
tv	Instante em que a tensão cruza o zero.
U	Tensão.
и	Queda de tensão no circuito equivalente do MOV.
u_R	Queda de tensão no resistor não-linear do circuito equivalente do MOV.
$U_{1,}U_{2}$	Pontos de tensão para definição do coeficiente de não-linearidade.
UL	Tensão de linha.
Umcov	Valor da MCOV.
U_N	Tensão nominal do MOV.
V	Volt.
v	Coeficiente de Poisson.
Vm	Sobretensão de manobra.
V_n	Valor da tensão nominal de um para-raios.
Vr	Valor da tensão residual de um para-raios.
V _{REF}	Tensão de referência.
V _{ref0}	Valor da tensão de referência na primeira leitura de corrente de fuga.
Vrefn	Valor da tensão de referência da corrente de fuga na leitura n.
$V_{ u}$	Volume do MOV.
W	Watt.
x	Número de impulsos na função de ajuste das leituras de corrente de fuga.
Y	Função de ajuste das leituras de corrente de fuga.

Sumário

Resume)	v
Abstrac	t	vi
Lista de	e Figuras	vii
Lista de	e Tabelas	xi
Lista de	e Abreviaturas e Siglas	xii
Lista de	Símbolos	.xiv
1. Iı	ntrodução	20
1.1.	Motivação e originalidade	23
1.2.	Objetivo	24
1.3.	Estrutura	24
2. R	evisão da literatura	26
2.1.	Para-raios: um breve histórico	26
2.2.	Trabalhos sobre o varistor a ZnO	31
2.3.	Processo de fabricação do varistor a ZnO	38
2.4.	Mecanismos de condução e propriedades elétricas	40
2.4	I.1. Decomposição da corrente de fuga	45
2.4	4.2. Análise da distorção harmônica	49
2.5.	Capacidade de absorção de energia	49
2.6.	Envelhecimento e Degradação	55
3. P	rocedimento Experimental	60
3.1.	Características dos varistores a ZnO utilizados neste trabalho	61
3.2.	Determinação do número de amostras por ensaio	61
3.3.	Montagem Experimental e procedimentos para a caracterização elétrica	62
3.3	3.1. Leitura da corrente de fuga	62
3.3	3.2. Decomposição da corrente de fuga	64
3.3	3.3. Aplicação de impulsos de corrente	65

3.4. Aquisição e tratamento dos registros oscilográficos	71
4. Análise dos resultados experimentais	74
4.1. Método dos acréscimos e decréscimos	74
4.2. Envelhecimento por impulsos de corrente	76
4.3. Avaliações da corrente de fuga	80
4.3.1. Picos resistivos da corrente de fuga	81
4.3.2. Potência consumida à MCOV	86
4.3.3. Componentes harmônicas à MCOV	
4.4. Comparação entre fabricantes	92
4.5. Discussão dos resultados	96
5. Considerações finais	99
Referências Bibliográficas	100
ANEXO A	109
ANEXO B	110

1. Introdução

As tensões normais de operação não causam estresses prejudiciais à isolação dos sistemas elétricos de potência (SEP) caso esta tenha sido corretamente dimensionada. Problemas nestes níveis de tensão geralmente ocorrem em condições especiais, como degradação do material ao longo dos anos em operação devido à presença de poluição, umidade excessiva, radiação ultravioleta (UV) e atos de vandalismo, por exemplo.

O uso de material de baixa qualidade, as eventuais falhas no processo de produção ou projetos equivocados também podem afetar a longevidade dos equipamentos utilizados no SEP, o que pode acelerar a degradação dos para-raios e resultar em sua falha prematura. A fim de evitar este cenário, as normas que regem os procedimentos de testes em equipamentos do SEP exigem ensaios elétricos que reproduzam os efeitos de intemperismos (poluição artificial por névoa salina, aquecimentos secos e úmidos, efeitos da chuva e da radiação UV), nos quais espera-se que apenas materiais apropriados sejam aprovados. Além disto, a degradação é estudada a fim de obter métodos para estimar a vida útil destes materiais sob diversos cenários, inclusive alguns não previstos pelas normas pertinentes [1].

Os SEP estão suscetíveis a sobretensões que têm origem interna ou externa ao sistema, e que podem interferir no cenário previsto de degradação dos seus equipamentos. As sobretensões de origem interna estão relacionadas às mudanças nas condições de operação do sistema, como manobras de chaveamento, falha no sistema e flutuações na geração ou na carga, enquanto as sobretensões de origem externa estão relacionadas à incidência de descargas atmosféricas e são independentes da tensão do sistema [2].

Novamente, as normas pertinentes a cada equipamento preveem estes possíveis cenários e ditam os procedimentos de ensaio para a reprodução dos fenômenos envolvidos. Assim como ocorre com os efeitos dos intemperismos, diversos estudos são realizados para determinar os limites de operação e parâmetros de degradação de diversos elementos do SEP sob diferentes tipos de sobretensões [3, 4].

Associadas a essas sobretensões, ocorrem elevações de corrente que, a exemplo de uma descarga atmosférica, podem chegar a valores de dezenas de quiloamperes. São valores que causariam grandes danos ao sistema caso não houvesse a atuação de algum dispositivo de proteção para evitar que estas sobretensões atingissem seus equipamentos.

Assim, no SEP, um dos elementos instalados para atuar na proteção do sistema é o pararaios. Sua função é reduzir o nível da sobretensão a valores compatíveis com a suportabilidade do sistema e escoar as sobrecorrentes à terra, de forma a proteger diversos equipamentos que compõem uma subestação de potência ou simplesmente um único transformador de distribuição [2]. A Figura 1 mostra um gráfico da proteção oferecida pelos para-raios frente a sobretensões de diferentes magnitudes e durações.



Figura 1. Representação da magnitude das tensões e sobretensões no SEP em relação ao tempo de solicitação. Adaptado de [5].

A escala de tempo da Figura 1 corresponde a:

- a. Sobretensões de frente rápida: microssegundos;
- b. Sobretensões de frente lenta: milissegundos;
- c. Sobretensões temporárias: segundos;
- d. Tensão de operação: regime permanente.

O funcionamento dos para-raios é ditado pelos componentes que compõem sua parte ativa: os varistores. A palavra varistor é um acrônimo entre as palavras em inglês "variable" (variável) e "resistor" (resistor). O comportamento de um varistor ideal corresponderia a um circuito aberto para tensões normais do sistema, e a um curto-circuito para sobretensões, conforme mostra a Figura 2.



Figura 2. Curva característica de um varistor ideal frente a uma sobretensão Vs. Adaptado de [6]

Porém, o comportamento de um varistor real difere daquele do elemento ideal. Trata-se de um resistor cuja relação entre tensão e corrente é variável de acordo com o nível de tensão a que é submetido: linear de alta resistividade a baixas tensões, linear de baixa resistividade quando submetido a tensões elevadas, e uma relação não linear, de transição, entre estes dois comportamentos [7]. Desta forma, tem-se a uma corrente de fuga da ordem de microampères quando o para-raios está sob tensão nominal, mas corrente de descarga da ordem de quiloamperes e tensão residual dentro da suportabilidade do sistema diante da ocorrência de uma sobretensão.

Os primeiros para-raios modernos utilizavam varistores à base de carbeto de silício (SiC) [2]. Estes para-raios possuíam um invólucro de porcelana que acomodava não somente os varistores, mas também centelhadores posicionados em série. Os centelhadores eram necessários devido ao fato de os varistores a SiC possuírem um baixo coeficiente de não linearidade, de forma que conduziriam correntes de fuga na ordem das centenas de amperes caso fossem submetidos à tensão de operação na ausência destes centelhadores.

Até a década de 1960, o óxido de zinco (ZnO) possuía aplicações em diversas áreas da indústria, desde aplicações na medicina [8] à produção de borracha [9]. Mas foi apenas no final da década de 1960 que a possibilidade de aplicação do ZnO em varistores foi observada.

Os varistores que utilizam o ZnO são comumente chamados na literatura de varistores a óxido metálico (MOV, do inglês "*Metal Oxide Varistors*"). A descoberta de suas propriedades não-lineares foi feita por MATSUOKA em julho de 1967. Na época, MATSUOKA era funcionário da *Matsushita Electric Co.* em Osaka, Japão, que requisitou a ele o desenvolvimento de um novo material com propriedades não-lineares superiores às dos materiais conhecidos até então. Sua descoberta representaria o fim do domínio dos varistores a

SiC, especialmente na produção de para-raios. Seu primeiro trabalho sobre sua descoberta foi publicado em 1971, no qual foram discutidas as propriedades não lineares dos MOVs [10].

Assim, apesar de ainda existirem projetos de para-raios a ZnO com invólucros cerâmicos [5], estes invólucros foram em sua maioria substituídos por outros do tipo polimérico, mais leves e que não apresentam os mesmos riscos de fragmentação oferecidos pelo material anterior. Além disso, apresentam vantagens na sua aplicação em regiões com altos índices de poluição, pois além do melhor comportamento do material sob estas condições, há pouco espaço vazio em seu interior, o que evita a penetração de poluição e umidade e a consequente ocorrência de descargas parciais, como ocorre nos invólucros cerâmicos [2].

Em função de suas vantagens em relação a seu antecessor, o ZnO tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores desde a descoberta de suas propriedades como varistor, com trabalhos focados em diversas características da sua aplicação, como os efeitos das variáveis do processo de fabricação e de diferentes aditivos nas características não lineares dos MOVs [10-12], o desenvolvimento de modelos baseados em seu mecanismo de condução [13-15], a degradação por radiação ultravioleta e poluição [16] e frente a diferentes solicitações elétricas, como envelhecimento em AC, DC ou pela aplicação de surtos [17-32].

1.1. Motivação e originalidade

Não há consenso quanto à relação entre a capacidade de absorção de energia de MOV e a duração do surto a que é submetido, com trabalhos que divergem quanto à dependência entre estes dois fatores [33-36]. Além disto, o processo de degradação de varistores submetidos a impulsos de mesma energia em diferentes formas de onda de frente rápida, em especial as variações da corrente de fuga com o envelhecimento nestas condições, ainda não foi abordado.

Assim, neste trabalho, varistores de 3 kV de tensão nominal (U_N) e 5 kA de corrente nominal de escoamento (I_N), de três fabricantes distintos (nomeados A, B e C) foram submetidos a diversas séries de impulsos e tiveram seus níveis de degradação avaliados pela análise dos dados relativos à energia aplicada nas descargas e às leituras de corrente de fuga.

Apesar da prevalência de para-raios com I_N de 10 kA nas redes de distribuição do Brasil, a viabilidade da utilização de para-raios de distribuição com I_N de 5 kA já foi comprovada com base em um estudo realizado em aproximadamente 9 mil para-raios retirados de campo, na região sul do Brasil [37]. Há também indícios de que a capacidade de absorção de energia por unidade de volume é maior em varistores de menor diâmetro [34]. Ambos os fatores implicam na possibilidade de redução de custos para o setor.

Para este estudo, foram utilizadas três formas de onda previstas em norma pertinente [38] com duração da ordem de microssegundos: $4/10 \ \mu$ s, $8/20 \ \mu$ s e $30/75 \ \mu$ s. Esta escolha foi motivada devido à falta de informações tanto sobre a capacidade de absorção de energia de MOVs quanto sobre seus efeitos sobre o processo de degradação decorrente de descargas sequenciais de mesma energia nas formas de onda propostas.

A capacidade de absorção de energia dos varistores foi avaliada de duas formas: pelo Método dos Acréscimos e Decréscimos (MAD) e pela aplicação sequencial de impulsos. O que difere este trabalho das demais pesquisas que utilizam a aplicação de impulsos de corrente para promover a degradação dos MOVs é a definição da intensidade destes impulsos com base na energia aplicada, e não no valor de pico da corrente de descarga.

Assim, com as diferentes condições propostas neste trabalho é possível avaliar a influência do número de aplicações, da duração dos impulsos e da energia aplicada na suportabilidade dos MOVs. Isto foi feito por meio do MAD para a definição da capacidade de absorção de energia frente a uma única descarga e com a aplicação sequencial de impulsos para a avaliação do processo gradual de degradação em cada condição de envelhecimento proposta.

1.2. Objetivo

O objetivo desta pesquisa é correlacionar a energia absorvida pelo MOV e sua degradação. Avalia-se a influência da energia do impulso aplicado, da sua forma de onda e do número de descargas sobre a capacidade de absorção de energia de MOVs e suas consequências na corrente de fuga no decorrer do envelhecimento por impulsos de corrente.

Busca-se avaliar padrões que indiquem, após poucos impulsos, o fabricante cujas amostras apresentem melhor desempenho a longo prazo. Com comparação dos resultados de diferentes fornecedores de MOV, propõe-se um método alternativo, de menor custo e menor duração, para os fabricantes de para-raios escolherem o material a ser usado sem que tenham que realizar todos os procedimentos exigidos por norma em todos os candidatos. Isso promove a redução dos custos de desenvolvimento do projeto e melhora a qualidade do produto final.

1.3. Estrutura

A presente tese é dividida em 5 capítulos, com esta introdução, para a discussão do tema abordado.

O capítulo 2 traz o desenvolvimento teórico sobre os pontos relevantes na redação e compreensão desta tese. Inicia com um breve histórico do desenvolvimento dos para-raios, até o para-raios a ZnO. Em seguida, faz menção a outros trabalhos relacionados aos MOVs que contribuíram não só para a aquisição do conhecimento necessário para a redação deste trabalho, mas também para o desenvolvimento dos MOVs no decorrer dos anos, ao aprimorar sua funcionalidade, propor modelos para sua representação e estudar os mecanismos envolvidos na sua degradação. Na sequência, aborda o processo de fabricação dos varistores, que possui relação direta com seu funcionamento;

Ainda no capítulo 2 são discutidos os mecanismos de condução dos MOVs e as relações microestruturais que regem seu funcionamento. As características da corrente de fuga e do comportamento frente a impulsos dos varistores é analisada em seguida. É feito então o desenvolvimento a respeito da capacidade de absorção de energia dos MOVs, e encerra-se o capítulo com a análise dos mecanismos envolvidos na degradação dos varistores.

No capítulo 3 é apresentado o procedimento experimental aplicado nesta pesquisa. Inicia-se com a especificação das amostras utilizadas, bem como a determinação de como estas serão divididas para a realização dos ensaios elétricos propostos. Em seguida, são apresentados os procedimentos utilizados para a caracterização elétrica dos MOVs: a leitura da corrente de fuga e a aplicação de impulsos de corrente. Por fim são apresentadas as informações sobre os métodos de aquisição dos dados e os tratamentos realizados nos sinais.

No capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos. São apresentados os gráficos que correlacionam o número de impulsos, a energia aplicada e a forma de onda na capacidade de absorção de energia das amostras. Em seguida, são avaliadas as mudanças na corrente de fuga no decorrer do processo de degradação. Encerra-se o capítulo com uma discussão dos resultados obtidos e com a proposição de um método para avaliação e comparação do desempenho de amostras de diferentes fabricantes.

Por fim, o capítulo 5 encerra o texto com as considerações finais e as sugestões de estudos futuros com base nos resultados obtidos nesta pesquisa.

2. Revisão da literatura

O objetivo deste capítulo é fornecer a base teórica para o desenvolvimento deste trabalho. Inicia-se com a apresentação das etapas de evolução dos para-raios e a descrição de seu funcionamento ao longo das suas diferentes fases até o desenvolvimento do para-raios a óxido metálico. São apresentados os resultados de outros trabalhos sobre a degradação dos MOVs, não somente para a compreensão do processo de envelhecimento deste material, mas também para a identificação dos pontos em que este trabalho difere dos demais.

Em seguida, após considerações sobre o processo de fabricação dos varistores, serão apresentados seus mecanismos de condução, suas propriedades elétricas e métodos de avaliação de sua corrente de fuga. Por fim são abordados os conceitos relativos aos fenômenos envolvidos na degradação frente a surtos e à capacidade de absorção de energia dos MOVs.

2.1. Para-raios: um breve histórico

Os para-raios são os elementos responsáveis pela proteção do SEP contra parte das sobretensões que podem incidir sobre seus equipamentos. Eles contribuem diretamente para a confiabilidade do sistema e garantem a continuidade de sua operação. Fazem isto ao limitar o valor das sobretensões a níveis condizentes com a suportabilidade dos equipamentos os quais foram projetados para proteger e ao escoar à terra as sobrecorrentes associadas a estes surtos. O foco neste item é descrever brevemente o princípio de funcionamento dos para-raios em seus diferentes estágios de evolução.

As primeiras patentes de para-raios foram apresentadas no fim do século XIX, e consistiam basicamente de centelhadores. Apesar da pouca presença no SEP nos tempos atuais, estes equipamentos ainda possuem aplicações específicas em alguns cenários, como na proteção de redes e sistemas de baixa tensão, telecomunicação e eletrônicos, em que a corrente subsequente em frequência nominal é baixa o suficiente para que ocorra a extinção natural dos arcos [6]. Desde então os para-raios são desenvolvidos para atender às novas demandas do SEP, como o crescimento da rede e o aumento dos níveis de tensão de transmissão e distribuição. As etapas de evolução dos para-raios estão ilustradas na Figura 3.

O dispositivo representado em (A), na Figura 3, é o centelhador. Na presença de um nível de tensão superior à tensão disruptiva entre seu terminal de linha e o terminal aterrado – definida pelo espaçamento em ar entre os dois pontos, pela geometria dos eletrodos e influenciada pelas condições atmosféricas – ocorre a abertura de um arco elétrico entre seus

eletrodos, o que limita a amplitude do valor de tensão no terminal protegido. A desvantagem deste equipamento é a necessidade da atuação de outro elemento de proteção para que o curtocircuito estabelecido entre os terminais do centelhador seja cessado.



Figura 3. Evolução dos dispositivos de proteção contra surtos de tensão [6]

A primeira alternativa para a resolução do problema da corrente subsequente foi o uso de "*non-arcing metals*" (metais sem arco, em tradução livre) apresentada por WURTS, em 1892 [39]. São compostos por ligas metálicas que conduzem corrente em um sentido com facilidade, porém necessitam de uma tensão mais elevada para iniciar a condução no sentido inverso, o que causaria a extinção do arco entre os terminais. Surgiram assim os "para-raios multicentelhadores", que consistem em associações dos centelhadores compostos por estas ligas em série e em paralelo com resistores, de forma que sobretensões de baixa amplitude circulassem pelos resistores, enquanto as de amplitude elevada eram escoadas pelos centelhadores [40].

Com o aumento dos níveis de curto-circuito dos sistemas elétricos, estes para-raios multicentelhadores passaram a apresentar altos índices de falha, geralmente pela não interrupção da corrente subsequente. Com isso, novos dispositivos foram desenvolvidos, inicialmente à base de dispositivos eletrolíticos no lugar dos resistores e, posteriormente, à base de óxidos (como o peróxido de chumbo) que, quando ligeiramente aquecidos, alteram seu comportamento elétrico, de condutor para isolante [40].

Com a descoberta das propriedades não-lineares do SiC em meados da década de 1930, a sua consequente aplicação em para-raios trouxe avanços significativos na proteção do SEP contra sobretensões. Estes para-raios possuíam esquema conforme (B) da Figura 3, e consistiam em uma ou mais colunas de varistores de SiC associados em série a centelhadores. Deste modo não havia corrente pelo para-raios quando este era submetido à tensão nominal da rede devido à presença dos centelhadores, ao mesmo tempo em que os varistores garantiam a interrupção da corrente subsequente quando esta corrente cruzasse o zero, conforme mostra a Figura 4.



Figura 4. Característica de operação de um para-raios convencional a carbeto de silício com centelhadores estáticos. Adaptado de [6]

Os valores destacados na Figura 4 correspondem a:

- U_L : tensão da linha;
- *Up*: valor de pico da tensão residual devido à descarga atmosférica;
- *Ip*: corrente de pico da descarga;
- *Is*: corrente subsequente.

A atuação deste tipo de para-raios frente a uma sobretensão introduz o conceito de tensão residual devido às características resistivas dos varistores a SiC. Assim, há uma diferença de tensão entre os terminais do para-raios durante sua atuação e, consequentemente, nos equipamentos por ele protegidos. Este fato não se caracterizou inicialmente como um problema, uma vez que os para-raios eram dimensionados de forma que a tensão residual entre seus terminais fosse compatível com o nível de suportabilidade destes equipamentos.

O funcionamento dos para-raios a SiC foi então aprimorado com a introdução dos centelhadores ativos, conforme exibido em (C) da Figura 3. O funcionamento dos centelhadores está relacionado à presença de bobinas que produzem um campo magnético intenso durante as descargas de corrente e alongam os arcos em seu interior pelo princípio do sopro magnético. Assim, a queda de tensão ocorre não mais unicamente sobre os varistores, mas também nos centelhadores, o que limita as correntes subsequentes que podem então ser interrompidas em qualquer ponto da onda de tensão, e não mais apenas quando esta cruza o zero. Este funcionamento está ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Característica de operação de um para-raios convencional a carbeto de silício com centelhadores ativos. Adaptado de [6]

Porém o constante aumento dos níveis de tensão do SEP fez com que os níveis de tensão residual dos para-raios a SiC se tornassem um empecilho devido à necessidade de adequar as capacidades de isolamento de todos os demais componentes do sistema. A busca por materiais com melhores características não-lineares para a resolução deste problema culminou com a descoberta das propriedades varistoras do ZnO por MATSUOKA [10].

O ZnO possui um coeficiente de não linearidade superior ao do SiC, de forma que a corrente pelo para-raios a ZnO submetido à tensão de operação é limitada a poucos microampères, o que dispensa o uso de centelhadores em série conforme representado pelo esquema (D) da Figura 3. A comparação da relação entre tensão e corrente dos varistores para estes dois materiais é mostrada na Figura 6.



Figura 6. Comparação da relação tensão x corrente dos varistores a ZnO e SiC [41].

Os para-raios a ZnO apresentam níveis de tensão residual menores que aqueles a SiC, o que solucionou o problema que surgiu com o aumento das tensões máximas do SEP. Além

disso, o fato de dispensarem centelhadores em série facilitou a substituição dos invólucros cerâmicos por materiais poliméricos, o que resultou em melhorias econômicas, de desempenho e de segurança.

A ausência de centelhadores em série resulta em constante corrente de fuga através do para-raios. Esta corrente de fuga é da ordem de microampères e, em condições normais de operação, a dissipação de calor pelo invólucro é suficiente para manter a estabilidade térmica do equipamento, cuja curva pode ser representada conforme a Figura 7.



Figura 7. Características de potência consumida por um resistor a óxido metálico e de potência dissipada pelo invólucro em função da temperatura de operação [6].

A maior parte dos invólucros poliméricos utilizados na fabricação de para-raios são feitos com compostos de silicone. Entretanto, estudos comprovam também eficácia da utilização de materiais a base de polietileno para a aplicação em para-raios de distribuição [42]. A dissipação de calor através dos invólucros feitos com ambos os materiais não é um problema quando os varistores estão em condições normais de operação. Portanto, as principais solicitações frente as quais estes invólucros devem ser testados são os efeitos dos intemperismos por meio deensaios que reproduzem condições ambientais. Assim, os MOVs devem ser os principais alvos dos estudos a respeito do consumo de potência e os fatores envolvidos no processo de degradação que levam ao aumento deste consumo.

2.2. Trabalhos sobre o varistor a ZnO

Desde a descoberta das propriedades não-lineares do ZnO por MATSUOKA [10], estudos são realizados para a análise do mecanismo de condução e do processo de degradação dos MOVs frente a diversos tipos de solicitações elétricas e térmicas. Em seu trabalho, MATSUOKA analisa a influência das variáveis do processo de fabricação – dopantes e temperaturas de sinterização – sobre as propriedades elétricas do varistor, conforme mostra a Figura 8.



Figura 8. Efeitos da temperatura de sinterização e da concentração de dopantes sobre as propriedades elétricas do MOV. Adaptado de [10].

MATSUOKA já havia atribuído o comportamento não-linear do MOV às camadas intergranulares ricas em óxidos dopantes, porém o modelo dos mecanismos de condução como se conhece atualmente foi inicialmente proposto e desenvolvido em 1975 por LEVINE [13] e em 1977 por BERNASCONI et al. [14], e é baseado nas DBS. Este modelo confirma a atribuição feita por MATSUOKA, e desde então vem sendo aprimorado para explicar corretamente o funcionamento dos MOVs.

Em 1980, TOMINAGA et al. [17] estudaram a degradação a longo prazo e o fenômeno de avalanche térmica em para-raios a ZnO. Até então, os para-raios a MOV já haviam comprovado na prática que cumpriam seu papel na proteção contra sobretensões e eram cada vez mais utilizados no SEP. Isto fez com que esta degradação a longo prazo se tornasse motivo

de interesse, especialmente em sinais tanto em AC quanto em DC, uma vez que os para-raios a ZnO, ao contrário daqueles a SiC, apresentavam constante corrente de fuga quando submetidos à tensão de operação devido à ausência de centelhadores em série.

TOMINAGA et al. [17] analisaram o comportamento de varistores submetidos a tensões alternadas de diferentes amplitudes a diferentes temperaturas por meio da leitura da corrente de fuga e a avaliação da sua componente resistiva, conforme mostra a Figura 9.



Figura 9. Variação da componente resistiva da corrente de fuga em função do tempo sob envelhecimento a diferentes temperaturas e níveis de tensão. Adaptado de [17]

Observou-se então uma relação direta entre o valor da componente resistiva da corrente de fuga e a temperatura de ensaio em amostras submetidas à mesma tensão. De forma semelhante, foi observado, nas amostras ensaiadas à mesma temperatura, que maiores valores de tensão resultam em componentes resistivas de corrente de fuga de maior amplitude.

SHILIANG, em 1983 [18], estudou o comportamento de MOVs degradados em DC e por uma série de 20 impulsos de 5 kA, na forma 8/20 μ s, e define que "degradação" corresponde a qualquer evento que resulte em uma modificação permanente nas características não-lineares de tensão e corrente do varistor. De forma semelhante a TOMINAGA et al. [17], SHILIANG optou pela análise do comportamento da corrente de fuga das amostras antes e após o processo de degradação, e observou variações nos valores da tensão de referência e resistência para obter uma corrente de 13 μ A RMS. Os resultados obtidos para três conjuntos de amostra analisados estão resumidos na Tabela 1.

	Envelhecimento	Ι	II	III
$V_{13\mu A}\left[V ight]$	Antes	28,63	28,70	24,60
	Depois	28,38	7,40	0,20
Resistência [MΩ]	Antes	2,21	2,21	1,89
	Depois	2,17	0,56	0,015

Tabela 1. Valores de tensão de referência e resistência obtidos antes e após o processo de envelhecimento. Adaptado de [18].

Observou-se a redução da tensão de referência após o envelhecimento em todos os conjuntos de amostras analisados, o que indicou que a aplicação de impulsos de corrente também resulta na mudança do comportamento elétrico dos MOVs. Por fim, com base nas conclusões tiradas em seu trabalho, SHILIANG [18] fez uma divisão do processo de degradação em três partes:

- Degradação inicial, ligada às modificações ocorridas nas DBS entre os grãos de ZnO;
- Aprofundamento da degradação causada pela formação de caminhos condutivos na estrutura do MOV;
- Proliferação destes caminhos condutivos como o principal mecanismo de degradação. Estes caminhos condutivos definidos por SHILIANG são hoje denominados na literatura como *hotspots* ("pontos quentes", em tradução livre).

Um estudo sobre a degradação de varistores submetidos a tensão alternada em diferentes meios foi realizado em 1986 por VICAUD [19]. O método consistia na aplicação da MCOV em AC a uma temperatura que variava entre 110 °C e 140 °C, após a aplicação de um impulso atmosférico e um de manobra. A Figura 10 mostra as curvas características de potência dissipada pela temperatura de varistores com diferentes níveis de degradação.

As curvas e pontos de interesse na Figura 10 são:

- Reta referente à potência dissipada -D;
- Curvas características de potência dissipada em função da temperatura dos três varistores – V₀, V₁ e V₂, em ordem crescente de nível de degradação;
- Temperatura limite de estabilidade P_0 , P_1 e P_2 ;
- Temperatura de operação T_0 , $T_1 e P_2$;



Figura 10. Potência dissipada em função da temperatura para amostras com diferentes níveis de degradação. Adaptado de [19].

Assim, observa-se que a temperatura limite de estabilidade térmica é inversamente proporcional ao nível de degradação da amostra, de forma que a temperatura de operação corresponda ao seu ponto limite de estabilidade térmica para a amostra mais degradada.

Além disto, VICAUD [19] observou, durante seu trabalho, que as degradações apresentadas pelas amostras ensaiadas em ar eram acentuadas quando analisadas em SF₆ e em óleo de transformador. Desta forma, foram atingidos dois objetivos com o trabalho:

- Desconsidera-se, inicialmente, o uso de outros meios para a imersão dos varistores em projetos de para-raios;
- Propõe-se um método de envelhecimento acelerado em AC, no qual amostras de MOV representativas de um para-raios completo seriam submetidas a ensaios de operação combinada pela aplicação de diversos tipos de solicitações elétricas: impulsos de corrente de alta amplitude, impulsos de corrente de alta energia, sobretensões temporárias e aplicação contínua da tensão de operação.

MEIRONG et al. [20] divergiram dos métodos de degradação que incluíam sinais em AC e DC e realizaram, em 1991, a análise da degradação de MOVs somente por impulsos múltiplos. Foram utilizados dois métodos: aplicação de cinco impulsos com diferentes

densidades de corrente, e aplicação de até cinquenta impulsos com uma densidade de corrente mais baixa que a utilizada anteriormente.

As amostras foram analisadas porespectroscopia de corrente termicamente estimulada (TSC, do inglês *Thermally Stimulated Current*), que consiste em aquecer a amostra à temperatura pré-determinada, aplicar uma tensão DC de baixa amplitude e resfriar a amostra rapidamente a até -80 °C, ao mesmo tempo em que se remove a aplicação de tensão. À medida em que a amostra é novamente aquecida à taxa pré-determinada, a TSC é plotada em ampères em função da temperatura conforme mostra a Figura 11:



Figura 11. TSC para amostras envelhecidas a 5 impulsos de diferentes densidades de corrente. Adaptado de [20].

As variações nos espectros obtidos nas amostras degradadas acrescentaram novas informações a respeito da degradação das DBS que complementam estudos anteriores e reafirmam ser este o principal mecanismo de degradação dos MOVs. Com isso, é confirmado que a análise da espectroscopia de TSC também é aplicável para a verificação do nível de degradação dos varistores, além de constatar que o aumento da densidade de corrente a uma mesma forma de impulso também gera maiores degradações.

TU et al. [21], em 2013, mostraram que a TSC é também capaz de evidenciar a degradação de MOVs em AC, ao analisar amostras submetidas à MCOV por 7 dias a 135 °C. Os resultados obtidos são expostos na Figura 12.


Figura 12. TSC para varistores envelhecidos à MCOV a 135 °C. Adaptado de [21].

Uma alternativa às análises do comportamento elétrico de varistores degradados é a utilização de técnicas de espectroscopia, como o EDS (*Energy-Dispersive Spectroscopy* – espectroscopia por dispersão de energia, em tradução livre) [43, 44]. Com ela, é possível avaliar a variação da composição dos MOVs, especialmente dos elementos que compõem sua matriz intergranular, com o avanço do processo de degradação.

Nos estudos que utilizam impulsos de corrente para a análise da degradação dos MOVs, a energia aplicada tende a ser considerada indiretamente, de forma que a intensidade dos impulsos é definida pelos valores de pico de corrente [27, 32]. Além disto, não há consenso sobre a influência da forma de onda sobre a capacidade de absorção de energia dos varistores.

Segundo MARTINEZ ([33], p. 134), "a capacidade de absorção de energia dos resistores a óxido metálico é, dentro de limites de tempo de descarga razoáveis, constante e independe da forma e da amplitude dos impulsos de corrente". Esta afirmação foi tomada com base nos resultados obtidos em impulsos retangulares com durações entre 540 µs e 5250 µs e impulsos semi-senoidais com durações entre 860 µs e 18 000 µs. Entretanto, HE et al. [34] obtiveram resultados que sugerem a não-uniformidade da capacidade de absorção de energia dos MOVs, conforme mostra a Figura 13.



Figura 13. Capacidade de absorção de energia em função do tempo. Adaptado de [34].

As razões por trás desta divergência de conclusões podem estar ligadas a diversos fatores. Primeiramente, a duração dos impulsos analisados por MARTINEZ e por HE et al. não coincidem; de fato, apenas o impulso retangular de 2 ms está dentro da faixa de tempo estudada por ambos os autores, o que impossibilita a sobreposição dos resultados em uma comparação direta.

Os métodos utilizados nos dois trabalhos também pode ser um motivo para a divergência entre as conclusões. Enquanto MARTINEZ utilizou o MAD para a definição dos limites de capacidade de absorção de energia dos varistores, HE et al. exibiram seus resultados em função dos valores médio, máximo e mínimo encontrados (representados pela linha contínua, tracejada superior e tracejada inferior, respectivamente, da Figura 13).

Entretanto, ambos os trabalhos avaliaram a capacidade de absorção de energia frente a um único impulso. Além disto, dentre todas as formas de onda estudadas, apenas uma é de curta duração. A influência da forma de onda na degradação frente a múltiplas descargas não foi avaliada, o que não deixa claro se as relações observadas por cada autor são mantidas para varistores submetidos a um envelhecimento gradual.

Já em 2020, LI et al. [35], por sua vez, realizaram esta análise do processo de degradação de varistores submetidos a impulsos de mesma energia nas formas de onda 10/1000 µs e 2 ms, com amplitudes de corrente de respectivamente 260 A e 160 A. Os autores observaram que foram necessários 499 impulsos para a destruição física da amostra submetida a impulsos na primeira forma de onda, de menor duração, enquanto a amostra envelhecida por descargas de 2 ms permaneceu intacta após 940 impulsos.

Entretanto dois pontos devem ser observados: primeiramente, os impulsos de cada forma de onda foram aplicados em apenas 1 amostra; em segundo lugar, não houve análise do processo de degradação (como a evolução de variáveis relacionadas à corrente de fuga), apenas a determinação do número de impulsos aplicados.

ZHOU et al [36], em 2021, analisaram a distribuição da probabilidade de falhas para varistores submetidos à degradação por impulsos retangulares com durações de 20 μ s, 200 μ s e 2000 μ s. Entretanto, não há correlação direta entre os valores de energia aplicados nos impulsos, que tiveram suas intensidades definidas arbitrariamente em dois valores de pico de corrente para cada forma de onda. Os valores aplicados e a previsão de vida útil em função do número de descargas estão organizados na Tabela 2.

Grupo	Duração [µs]	Corrente de pico [A]	Número de impulsos
1	20	4170	17
2	20	876,8	288
3	200	451	27
4	200	298	829
5	2000	112	21
6	2000	70	6703

Tabela 2. Expectativa de vida dos grupos ensaiados. Adaptado de [36].

As conclusões apresentadas pelos autores também não fazem menção à energia aplicada nos impulsos, que afirmam que para descargas com a mesma corrente de pico, impulsos mais longos resultam em maiores degradações. Porém, não é possível prever por estes resultados o comportamento das amostras caso a energia aplicada fosse a mesma nas diferentes formas de onda.

Assim, a capacidade de absorção de energia frente a diferentes impulsos com duração na ordem dos microssegundos, bem como a influência destas formas de onda sobre o processo de envelhecimento de amostras submetidas à mesma energia, ainda são temas que precisam ser desenvolvidos para a melhor compreensão do processo de degradação dos MOVs.

2.3. Processo de fabricação do varistor a ZnO

As propriedades dos MOVs estão diretamente ligadas às variáveis envolvidas no seu processo de fabricação. Embora sejam encontradas, na literatura, referências quanto à utilização do método sol-gel [45, 46] e de técnicas de impressão 3D [47, 48] para a fabricação dos varistores há preferência pelo método padrão de sinterização em estado sólido (MSES) [49-51].

A não-linearidade dos MOV está relacionada à composição de sua matriz intergranular. Por isso, a escolha dos dopantes que serão utilizados interfere diretamente nas propriedades dos varistores produzidos. A Tabela 3 mostra a influência de alguns destes dopantes nas características do produto final.

Aditivos	Efeitos						
Bi ₂ O ₃ , CaO, CoO, SrO, MnO	Responsáveis pelo surgimento da não-linearidade						
K_2O	Inibe o crescimento dos grãos de ZnO						
Ga_2O_3	Melhora α , porém aumenta a corrente de fuga						
ZrO_2	Melhora a capacidade de absorção de energia						
SiO_2	Reduz a corrente de fuga						
	Reduz a tensão residual						
AlaOa	Aumenta o diâmetro dos grãos de ZnO						
A12O3	Aumenta a corrente de fuga						
	Melhora α						
	Eleva α a 60						
Nb ₂ O ₇	Reduz a corrente de fuga						
110205	Aumenta a capacidade de absorção de energia						
	Dobra a previsão de vida útil						

Tabela 3. Efeitos de alguns aditivos nas propriedades elétricas dos MOVs [52].

A etapa inicial do MSES é a moagem do ZnO junto com os dopantes que serão utilizados, e por si só já é objeto de estudos sobre seus efeitos na fabricação do varistor [53] [54]. Apesar da utilização de outros métodos de moagem, como vibração [53], grande parte dos trabalhos mostram que o método mais utilizado é a moagem por esferas [11, 12, 54]. Neste processo, a matéria prima é inserida em um recipiente cilíndrico (usualmente polimérico, como o polipropileno) e agitada junto com esferas (de zircônia ou alumina), de forma que o material seja moído pelo atrito e pelas constantes colisões com estas esferas. O período de agitação varia de acordo com o material a ser moído e as esferas utilizadas, e o processo geralmente é realizado com a adição de água para resfriamento do sistema.

As misturas são então secadas em estufas, a temperaturas que podem chegar a 120 °C, por até 12 h. Só então o material é prensado em discos, de forma que já se obtenha o formato desejado para o varistor. A próxima etapa é a sinterização, que interfere diretamente nas propriedades não lineares do material. Sabe-se que a temperatura de sinterização e as taxas de aquecimento e resfriamento têm influência direta no comportamento das barreiras de Schottky, no tamanho dos grãos e, consequentemente, no coeficiente não linear do varistor. Estas temperaturas de sinterização podem variar em uma faixa de 875 °C a 1 500 °C, com taxas entre 2 °C/min e 10 °C/min [55, 56].

Após o resfriamento, ambas as faces dos discos são pintadas com uma tinta condutiva, usualmente de alumínio, de forma a espalhar uniformemente a corrente por toda a área transversal do varistor.

2.4. Mecanismos de condução e propriedades elétricas

Um modelo da microestrutura de um MOV, com a disposição homogênea e ideal de grãos e da camada intergranular ao longo de todo o corpo cerâmico, está representado na Figura 14.



Figura 14. Modelo para a microestrutura da cerâmica de ZnO. Adaptado de [10].

Os eletrodos têm a finalidade de distribuir uniformemente a carga sobre toda a superfície do varistor. Assim, a corrente percorrerá várias junções entre grãos de zinco e camadas intergranulares através do varistor.

MATSUOKA [10] propôs a ideia de que a corrente pelos varistores é determinada pelo fluxo de cargas espaciais presentes na matriz intergranular ao supor que esta possui diversas vacâncias em sua estrutura por ser formada por óxidos [10]. Em seguida, outros estudos a respeito dos mecanismos de condução dos MOVs aperfeiçoaram a ideia proposta por MATSUOKA e determinaram que a condução é regida pelos conceitos da Dupla Barreira de Schottky (DBS) [13, 14].

A representação do diagrama energético entre as fronteiras de dois grãos de ZnO e camada intergranular " I_G ", se fossem adotadas separadamente (isto é, situação hipotética em

que não haja contato entre eles) é feita na Figura 15. Nela, E_{FG} e E_{FI} representam os níveis de Fermi (NF, equivalente ao nível máximo de energia ocupado por um elétron à temperatura de 0 K no material em questão) do grão de ZnO e da camada intergranular, respectivamente, enquanto E_C e E_V correspondem aos níveis de energia da banda de condução e da banda de valência.



Figura 15. Diagrama de energia antes do contato. Adaptado de [15].

Porém, quando estes elementos estão em contato, ocorrem três fenômenos na junção entre grãos: a "fixação do NF" (tradução livre de "*Fermi-Level Pinning*" - FLP), a flexão das bandas de energia e a formação de camada de depleção [57].

A FLP ocorre com a migração de portadores majoritários do ZnO (elétrons, por se tratar de um semicondutor tipo-n) para a fronteira da camada intergranular. Este fluxo de elétrons faz com que ocorra uma flexão das bandas de energia do grão de ZnO, o que aumenta o gap entre o nível de Fermi e a banda de condução na fronteira do grão, uma vez que os elétrons antes disponíveis para condução se encontram agora presos na interface da camada intergranular.

Este fluxo de cargas negativas faz com que surjam cargas espaciais positivas na fronteira do grão e forma uma camada de depleção. Este fenômeno ocorre nos dois grãos fronteiriços e resulta em uma DBS, que se repete em todas as junções entre grãos ao longo do varistor. O diagrama de energia após o contato é mostrado na Figura 16.



Figura 16. Diagrama de energia após o contato. Adaptado de [15].

Cada uma das três regiões tem um comportamento distinto, de forma que:

- Na Região I, o campo elétrico não é suficiente para a inserção de elétrons na banda de condução, tampouco para promover a redução da camada de depleção na região de contato entre os grãos;
- Na Região II ocorre a redução da camada de depleção. Esta é a região responsável pelo coeficiente não linear, de forma que quanto maior a altura da barreira de energia, maior o coeficiente de não linearidade do varistor;
- Na Região III houve a redução total da camada de depleção entre os grãos e a inserção dos elétrons na banda de condução. Ocorre então o livre fluxo de cargas elétricas.

Assim, os MOVs são materiais cerâmicos que apresentam diferentes comportamentos de condução elétrica de acordo com o nível de tensão a que são submetidos. Este comportamento está relacionado ao diagrama de energia da Figura 16, e a curva característica da relação entre tensão e corrente nas três regiões apresentadas segue o comportamento ilustrado na Figura 17.



Figura 17. Curva característica tensão x corrente de um varistor a ZnO [40].

A baixas tensões, os varistores se comportam como materiais ôhmicos de alta resistividade, com uma relação linear entre tensão e corrente. Esta relação é válida nas condições normais de operação do varistor sob tensão nominal, e corresponde à "Região I" nas Figuras 16 e 17. Entretanto, acima de determinado valor de tensão, que varia de acordo com as dimensões e composição do varistor, esse comportamento é alterado e a resistividade aparente do varistor deixa de ser constante, correspondente à "Região II", também chamada de região não-linear. A relação entre corrente I e tensão U em um MOV passa a ter uma nova relação, determinada pela Equação 1.

$$I = kU^a \tag{1}$$

A constante k é dependente do material do qual é feito o varistor. O expoente α é chamado de coeficiente de não linearidade, que determina como a corrente aumenta com a tensão aplicada. Tomados dois pontos na região não linear da curva característica do MOV, o coeficiente α pode ser determinado pela Equação 2.

$$\alpha = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log U_2 - \log U_1} \tag{2}$$

Na Região – III, que representa o comportamento dos varistores frente a surtos de alta tensão, a resistividade aparente do varistor torna-se extremamente pequena, de forma que cada pequeno acréscimo no valor de tensão resulte em um elevado acréscimo no valor da corrente conduzida.

A análise da corrente de fuga nas Regiões I e II é um método utilizada em vários trabalhos para a avaliação do estado MOVs [26-29, 58-61]. Esta corrente de fuga possui uma componente capacitiva e uma componente resistiva, em que a primeira é consideravelmente maior do que a segunda quando a amostra sob análise não teve sua integridade física comprometida e opera em um nível de tensão de acordo com aquele para qual foi projetada [26]. Tais componentes estão ligadas às junções entre grãos, que podem ser representadas simplificadamente em um circuito elétrico conforme Figura 18, que ilustra o comportamento das junções quando submetidos à tensão nominal de operação em frequência industrial.



Figura 18. Circuito equivalente para representação de MOV. Adaptado de [52].

Sendo:

- C_m: componente capacitiva determinada pelas camadas de depleção nas fronteiras entre grão e matriz intergranular;
- *R*_{DBS}: resistência variável, relacionada à polarização gradual das DBS;
- R_{ZnO} : resistência linear dos grãos de ZnO.

O MOV corresponde então, simplificadamente, a diversas associações em série e em paralelo do circuito da Figura 18. Neste circuito, é a componente resistiva que sofre maior alteração quando há um aumento da tensão aplicada ou da temperatura de operação, o que está

diretamente relacionada à degradação do para-raios e é um importante indicativo das suas condições [26].

Porém, para ilustrar o comportamento dos varistores frente a surtos de alta frequência, o circuito da Figura 18 deixa de ser válido. Isto porque as indutâncias, ignoradas neste modelo para baixas frequências, deixam de ser desprezáveis. Assim, o circuito equivalente da Figura 19 foi proposto para representar o comportamento do MOV para sinais de diferentes frequências [62].



Figura 19. Circuito equivalente para o MOV para diferentes frequências. Adaptado de [62].

A análise do circuito mostra que, para baixas frequências, as indutâncias $L_0 e L_1$, que no modelo proposto são da ordem de microhenry, podem ser desprezadas, e o resultado é um circuito equivalente semelhante ao modelo para baixas frequências, em que os resistores R_o e R_1 representam a resistência dos grãos de ZnO, o capacitor *Cm* relativo à matriz intergranular e $A_0 e A_1$ equivalentes às resistências não-lineares. Entretanto, para descargas atmosféricas da ordem de microssegundos, estas indutâncias passam a resultar em valores elevados de impedância, o que direciona maior parte da corrente pelo elemento não linear A_0 .

2.4.1. Decomposição da corrente de fuga

A norma ABNT NBR 16050:2012 [38] define que o valor da corrente de fuga no instante do pico de tensão pode ser considerado o valor de pico da componente resistiva da corrente de fuga durante a realização do ensaio na amostra, o que ocorreria no caso de um varistor representado pelo circuito simplificado da Figura 18.

Entretanto, resultados experimentais indicam a existência de uma componente capacitiva no ramo resistivo do circuito simplificado, uma vez que é observado um deslocamento de fase entre a componente resistiva da corrente de fuga e o sinal da tensão. Isto levou à elaboração de um método de decomposição baseado no circuito equivalente da Figura 20, proposto por ZHAO et. al [63].



Figura 20. Circuito equivalente do MOV proposto por ZHAO et. al [63].

A partir deste circuito, o método proposto por ZHAO et. al. parte das Equações 3 e 4.

$$i_R(t) = i(t) - C \frac{du(t)}{dt}$$
(3)

$$u_{R}(t) = u(t) - \frac{1}{C_{S}} \int i_{R}(t)dt$$

$$= u(t) - \frac{1}{C_{S}} \int [i(t) - C\frac{du(t)}{d(t)}dt$$

$$= \left(1 + \frac{1}{C_{S}}\right)u(t) - \frac{1}{C_{S}} \int i(t)dt$$
(4)

A corrente resistiva i_R deve estar em fase com a tensão resistiva u_R , de forma que ambas atingem o valor máximo no mesmo instante t_m , ou seja, com derivada nula conforme as Equações 5 e 6.

$$\left. \frac{di_R(t)}{dt} \right|_{t=t_m} = \left[\frac{di(t)}{dt} - C \frac{d^2 u}{dt^2} \right]_{t=t_m} = 0$$
(5)

$$\frac{du_R(t)}{dt}\Big|_{t=t_m} = \left[\left(1 + \frac{C}{C_S}\right)\frac{du(t)}{dt} - \frac{i(t)}{C_S}\right]\Big|_{t=t_m} = 0$$
(6)

Os sinais u(t) e i(t) podem ser expressos na forma de séries de Fourier, conforme as Equações 7 e 8.

$$u(t) = \sum_{\substack{k=0\\\infty}}^{\infty} (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t))$$
(7)

$$i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (p_k \cos(k\omega t) + q_k \sin(k\omega t))$$
(8)

Os coeficientes a_k , b_k , $p_k e q_k$ são dados por:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt \tag{9}$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \operatorname{sen}(k\omega t) dt \tag{10}$$

$$p_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(k\omega t) dt \tag{11}$$

$$q_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \operatorname{sen}(k\omega t) dt \tag{12}$$

Ao substituir as Equações 7 e 8 nas Equações 5 e 6, tem-se:

$$\frac{di_{R}(t)}{dt}\Big|_{t=t_{m}} = \sum_{k=0}^{\infty} [k\omega(q_{k} + k\omega Ca_{k})cos(k\omega t_{m}) - k\omega(p_{k} - k\omega Ca_{k})sen(k\omega t_{m})] = 0$$
(13)

$$\frac{du_{R}(t)}{dt}\Big|_{t=t_{m}} = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ k\omega \left[\left(1 + \frac{C}{C_{S}} \right) b_{k} - \frac{1}{C_{S}} \frac{p_{k}}{k\omega} \right] \cos(k\omega t_{m}) - k\omega \left[\left(1 + \frac{C}{C_{S}} \right) a_{k} - \frac{1}{C_{S}} \frac{q_{k}}{k\omega} \right] \sin(k\omega t_{m}) \right\} = 0$$
(14)

Como a componente fundamental dos sinais (ou seja, k = 1) constituem maior parte dos sinais, ao considerar que estas estão em fase, obtém-se as Equações 15 e 16 que correlacionam C e C_S :

$$\frac{p_1 - \omega C b_1}{q_1 + \omega C a_1} = \frac{\left(1 + \frac{C}{C_S}\right)a_1 + \frac{1}{C_S}\frac{q_1}{\omega}}{\left(1 + \frac{C}{C_S}\right)b_1 + \frac{1}{C_S}\frac{p_1}{\omega}}$$
(15)

$$C_{S} = \frac{p_{1}^{2} + q_{1}^{2} + 2\omega C(a_{1}q_{1} - b_{1}p_{1}) + \omega^{2}C^{2}(a_{1}^{2} + b_{1}^{2})}{\omega[(b_{1}p_{1} - a_{1}q_{1}) - \omega C(a_{1}^{2} + b_{1}^{2})]}$$
(16)

O primeiro passo do esquema iterativo para a definição dos parâmetros C e C_S é estabelecer um valor inicial para C ao desconsiderar-se inicialmente o capacitor C_S no circuito equivalente do MOV (neste caso, $C_S = \infty$). Assim, o denominador da Equação 16 deve tender a zero, e o valor inicial de C é dado pela Equação 17.

$$C^{(0)} = \frac{b_1 p_1 - a_1 q_1}{\omega (a_1^2 + b_1^2)}$$
(17)

Calcula-se então i_R e u_R com as Equações 3 e 4, e avalia-se a correlação cruzada entre os dois vetores com a Equação 18. Caso estejam em fase, a análise da correlação cruzada atingirá seu valor de pico no instante de tempo zero.

$$r_{u_R i_R} = \int_{-\infty}^{\infty} u_R(\tau) i_R(t+\tau)$$
⁽¹⁸⁾

Caso a avaliação da correlação cruzada entre i_R e u_R não indique que estes estejam em fase, ajusta-se o parâmetro *C* conforme a Equação 19 e repete-se o processo conforme fluxograma da Figura 21 até que os vetores entrem em fase. Quando esta condição for satisfeita, obtém-se a componente resistiva da corrente de fuga, a partir da qual a componente capacitiva é determinada ao subtrair a componente resistiva da corrente total.

$$C^{(n+1)} = C^{(n)} - \frac{C^{(0)}}{100\ 000} \tag{19}$$



Figura 21. Fluxograma da decomposição da corrente de fuga conforme ZHAO et. al [63].

2.4.2. Análise da distorção harmônica

A análise da corrente de fuga é uma ferramenta de avaliação de para-raios que é feita em laboratório com um arranjo experimental de baixa complexidade. Porém a aplicação deste método em campo é consideravelmente mais complicada devido à necessidade de aquisição do sinal de tensão para uma avaliação correta da componente resistiva da corrente de fuga.

Um dos métodos utilizados no diagnóstico de para-raios é a análise da distorção harmônica do sinal da corrente de fuga total. Estudos indicam a evolução do terceiro harmônico do sinal de corrente com o envelhecimento dos MOVs, porém já se tem indícios da presença de sinais na faixa que inclui até o nono harmônico em varistores degradados por aplicação de impulsos de corrente e sobretensões [64-67].

A ferramenta matemática para a conversão de sinais contínuos no tempo em uma representação no espectro de frequência é a representação do sinal na forma de uma série, por meio da transformada de Fourier.Para sinais discretos usa-se, de forma análoga ao aplicado em sinais contínuos, a Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*).

Um meio para a aplicação da DFT em ferramentas computacionais é a transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), utilizada na obtenção do espectro de frequência dos sinais de corrente de fuga deste trabalho por meio de sua implementação em código desenvolvido no programa computacional MATLAB.

A FFT possui algumas limitações, especialmente na análise de inter-harmônicos, o que faz com que outros algoritmos sejam desenvolvidos em pesquisas especificamente voltadas a distorções harmônicas [67-69]. Entretanto, para múltiplos inteiros da frequência do sinal, a FFT apresenta resultados compatíveis com outros métodos e coerentes para as análises propostas nesta tese, e é considerada uma ferramenta adequada de aplicação da DFT para obter as componentes harmônicas de um sinal [67].

2.5. Capacidade de absorção de energia

Grande parte dos estudos sobre o comportamento dos MOVs frente a surtos atmosféricos são feitos com base nos valores de pico de corrente e tensão residual das aplicações de impulso. É fato que estes valores estão diretamente relacionados à energia total aplicada nos impulsos, mas existe pouca informação quantificada a respeito dos valores desta energia. Atenção especial a este tópico foi dada por MARTINEZ [33], que apresentou em seu

trabalho diversas considerações teóricas e práticas a respeito da capacidade de absorção de energia deste material.

A Tabela 4 apresenta propriedades dos MOVs utilizadas em análises dos esforços mecânicos decorrentes dos efeitos térmicos associados a descargas de corrente.

Densidade - ρ	5450 kg/m³
Calor Específico – c	544,3 J/kg°C
Condutividade Térmica - kt	20,47 W/m°C
Coeficiente de Difusão Térmica – D	6,90×10 ⁻⁶ m ² /s
Coeficiente Térmico de Expansão Linear - α_l	5,31×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Módulo de Elasticidade – El	$117,22 \times 10^9$
Coeficiente de Poisson – v	0,25

Tabela 4. Principais características médias dos resistores a óxido metálico [70].

Segundo MARTINEZ [33], um ponto relevante para a investigação da capacidade de absorção de energia de um MOV é a análise dos processos térmicos associados ao fenômeno de concentração de corrente, modelada conforme a Equação 20.

$$q_R = \frac{\sigma_F (1 - v)\rho c}{E l a_l} \tag{20}$$

Sendo:

- $q_{R:}$ Energia específica com base no volume [J/m³];
- $-\sigma_F$: Tensão média mínima de ruptura frente à flexão [N/m²]
- v: Coeficiente de Poisson;
- ρ : Densidade do varistor [kg/m³];
- *c*: Capacidade térmica [J/kg°C];
- *El*: Módulo de elasticidade [N/m²];
- α_l : Coeficiente térmico de expansão linear [°C⁻¹]

Ao se considerar os valores de corrente e tensão aplicadas durante um surto, o valor da energia específica por unidade de volume pode ser definido conforme a Equação 21.

$$q_R = \frac{1}{V_V} \int u(t)i(t)dt \tag{21}$$

Sendo:

- V_V : Volume do MOV [cm³];
- *i*(*t*): Corrente de descarga instantânea pelo resistor [A];
- u(t): Tensão residual instantânea associada à corrente de descarga pelo resistor [V].

A Equação 21 permite a análise de quaisquer formas de onda, uma vez que considera a integral dos valores instantâneos dos pares de tensão e corrente ao longo do impulso. Para simplificar matematicamente a análise, ao assumir uma forma de impulso retangular, a Equação 21 pode ser reescrita conforme a Equação 22.

$$q_R = \frac{1}{V_V} U I \tau \tag{22}$$

Sendo:

- *I*: Amplitude da corrente de descarga [A];
- U: Amplitude da tensão residual [V];
- $-\tau$: Tempo de duração da descarga [s].

O tempo de duração da descarga pode ser descrito para diferentes formas de onda de impulsos de corrente conforme a Equação 23.

$$\tau = \beta I^{-\gamma} \tag{23}$$

Sendo:

- β : Coeficiente de proporcionalidade da forma de corrente representa uma característica inerente à forma do impulso;
- *I*: Amplitude da corrente de descarga através do MOV [A];
- γ: Coeficiente característico do varistor representa uma característica inerente do MOV, com valor constante e independente da forma do impulso aplicado.

A combinação das Equações 20 e 22 resulta na Equação 24.

$$\frac{1}{V_V}UI\tau = \frac{\sigma_F(1-\nu)\rho c}{Ea_l}$$
(24)

A relação entre as amplitudes de corrente e tensão na região não-linear da curva de um MOV é dada pela Equação 1, transcrita por conveniência como Equação 25.

$$I = kU^{\alpha} \tag{25}$$

Desta forma, a substituição do valor de U da Equação 25 na Equação 24 resulta na Equação 26.

$$\tau = \frac{V_V \sigma_F (1 - \nu) \rho c k \frac{1}{\alpha}}{E a_l} I^{-\left[\frac{\alpha + 1}{\alpha}\right]}$$
(26)

As constantes β e γ podem ser então obtidas pela comparação entre as Equações 23 e 26, de forma que:

$$\beta = \frac{V_V \sigma_F (1 - v) \rho c k \frac{1}{\alpha}}{E a_l}$$
(27)

$$\gamma = \frac{\alpha + 1}{\alpha} \tag{28}$$

MARTINEZ [33] então afirma que a energia total aplicada durante um impulso de corrente de qualquer forma de onda em um MOV é definida pela Equação 29.

$$E_d = \int_0^{\beta I_0^{-\gamma}} u(t)i(t)dt$$
(29)

Sendo:

- E_d : Energia aplicada na descarga (J);
- *I*₀: Valor de pico da corrente de descarga [A].

A energia específica em função da MCOV (*Maximum Cuntinuous Operation Voltage*, referente à máxima tensão de operação contínua) projetada do MOV pode ser definida então pela Equação 30.

$$E_E = \frac{E_d}{U_{MCOV}} \tag{30}$$

Sendo:

- *E_E*: Energia específica em função da MCOV [J/V];
- U_{MCOV} : Valor da MCOV [V].

O limite da capacidade de absorção de energia de um MOV é uma variável que necessita de estudos estatísticos para ser definida, uma vez que existem diferenças entre os varistores inerentes ao processo de fabricação. Um dos métodos para tal análise é o MAD, que é aplicado em varistores como uma adaptação do procedimento previsto para a determinação da tensão disruptiva crítica de equipamentos isoladores [71]. Neste método, uma série de impulsos é aplicada, com o seguinte procedimento:

- Define-se um valor inicial de corrente para a aplicação dos impulsos com base em conhecimentos prévios ou dados de projeto, em que se considera que o valor aplicado esteja próximo ao limite de suportabilidade da amostra;
- Define-se o valor dos degraus entre as aplicações de 5% a 10% da tensão de carga do gerador;
- Caso a amostra não falhe no impulso, o valor da próxima aplicação será acrescido em 1 degrau; caso uma falha seja observada, o valor é decrescido em 1 degrau;
- Troca-se a amostra para a próxima aplicação. Diferentemente de ensaios pelo MAD em equipamentos isoladores, em um MOV há corrente da ordem de quiloamperes pela amostra. Caso esta não seja trocada após suportar uma aplicação, como foi solicitada em uma condição próxima a seu limite de capacidade de absorção de energia, a probabilidade de falha na aplicação seguinte será maior do que em uma amostra nova, e isto comprometeria a validade dos resultados.
- Repete-se o procedimento 3 até que se tenha ao menos 15 aplicações.

A falha do varistor, citada na descrição do procedimento do MAD, pode ocorrer de três maneiras:

- Destruição física da amostra, com a fragmentação do varistor;
- *Flashover*, com a abertura de arco elétrico total (entre eletrodos) ou parcial (entre um ponto intermediário da altura do varistor e um dos eletrodos);
- Concentração de corrente através das fronteiras externas do varistor, causado pela intensificação do efeito pelicular com impulsos de maior frequência e maior amplitude de corrente;

Os resultados são organizados conforme exemplificado na Tabela 5, referentes àqueles obtidos por MARTINEZ [33] para impulsos retangulares de 540 µs, onde anota-se com um círculo (O) os impulsos nos quais a amostra suportou, e com uma cruz (X) aqueles em que as amostras apresentaram falha.

Uc	Impulso Retangular - 540 µs													Ι									
[kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	[A]
23,5	Х																		Х		Х		2710
22,6		Х														Χ		0		0		0	2615
21,7			Х		Х				Х						0		0						2482
20,8				0		Х		0		Х		Χ		0									2312
19,9							0				0		0										2208

Tabela 5. Método dos acréscimos e decréscimos para impulso retangular de 540 µs. Adaptado de [33]

Com a tabela obtida, ao considerar uma distribuição simétrica de probabilidade de falha, o valor de corrente que corresponde a 50% de probabilidade de falha do varistor ($I_{50\%}$) e o desvio padrão dos resultados (σ) são determinados pelas Equações (31) e (32), respectivamente (adaptado do equacionamento previsto em norma para $U_{50\%}$ [71]):

$$I_{50\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{N} i_i \times f_N \tag{31}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (i_i - I_{50\%})^2}$$
(32)

Sendo:

- *I*_{50%}: corrente de escoamento crítica;
- *n*: Número de descargas;
- *N*: níveis de corrente aplicados;
- *i_i*: valor de pico do impulso de corrente;
- f_N : Número de ocorrências no nível de corrente N;
- $-\sigma$: Desvio padrão.

MARTINEZ [33] utilizou o MAD para analisar a suportabilidade dos MOVs frente a 5 formas de onda retangulares (com durações entre 540 µs e 5250 µs) e 4 formas de onda semisenoidais (contidas entre 860 µs e 18 000 µs). Desta forma, a correlação dos valores de corrente com a energia total aplicada, conforme a resolução da integral da Equação 29, pode ser feita por meio de aproximações como: valores de tensão residual constantes para ambas as formas, valor de corrente de descarga constante nos impulsos retangulares e equivalente a uma função seno para impulsos semi-senoidais. Obtém-se assim uma correlação direta entre $I_{50\%}$ e a energia relativa à probabilidade de 50% de falha do MOV ($E_{50\%}$).

Esta aproximação não é tão direta para as formas de onda exponenciais utilizadas nesta tese. Entretanto, o uso de osciloscópios digitais e ferramentas computacionais, aliadas à aquisição dos vetores de corrente de descarga e tensão residual, torna possível a quantificação do valor da energia total aplicada para qualquer forma de onda.

2.6. Envelhecimento e Degradação

Existem diversos métodos empregados na análise e monitoramento das condições dos para-raios, tanto instalados em linha quanto retirados de campo. Verificações da temperatura do para-raios com equipamentos de termovisão e medições do campo eletromagnético são métodos utilizados em equipamentos instalados, sem necessidade de remoção do para-raios da linha e de interrupções do fornecimento de energia elétrica. Porém, estas técnicas necessitam de equipamentos caros e produzem resultados de difícil análise [16]. Outro método utilizado em subestações para o monitoramento em tempo real das condições dos para-raios é a análise de sua corrente de fuga, com a instalação de medidores na base aterrada do para-raios [72].

Por não possuírem centelhadores em série com os varistores, há uma constante corrente de fuga nos para-raios a ZnO, o que resulta no aumento na temperatura do MOV pelo efeito Joule. Caso o para-raios esteja em boas condições físicas, esta corrente possui amplitude da ordem de microampères, e a dissipação de calor do equipamento é suficiente para manter o equilíbrio entre corrente de fuga e temperatura [64].

Porém, a incidência de uma descarga atmosférica faz com que o para-raios seja submetido a uma potência muito elevada em um intervalo muito curto (da ordem de μ s), o que gera uma elevação da temperatura por efeito Joule, como mostra a Equação 33 [43].

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{\rho c} \int_0^\tau i(t)u(t)dt$$
(33)

Sendo:

- *T*(*t*): Temperatura instantânea do MOV [°C];
- T_0 : Temperatura inicial do MOV no instante de aplicação da descarga [°C].

Conforme sugere a Equação 20, a suportabilidade de um MOV frente a impulsos atmosféricos está relacionada à solicitação térmica imposta sobre a amostra e tem relação direta com suas características mecânicas. O aquecimento Joule neste cenário é, possivelmente, grande o suficiente para causar a degradação física do varistor, seja pela formação de trincas devido ao aquecimento repentino e consequente dilatação dos grãos ou pela concentração da corrente por caminhos de menor resistência. Isto pode causar o amolecimento ou a fusão de grãos de ZnO e a vaporização de componentes formadores da matriz intergranular.

A concentração de corrente durante uma descarga atmosférica resulta no surgimento de *hotspots* (que, em tradução livre, significa "pontos quentes") devido à fusão de grãos de ZnO e à volatilização de óxidos da matriz intergranular [43]. O resultado de aplicações de impulsos na presença destes *hotspots* é o surgimento de perfurações, conforme mostra a Figura 22.



Figura 22. Perfuração devido à aplicação sequencial de impulsos atmosféricos em um MOV [43]

Estas perfurações comprometem a resistência mecânica do varistor (e consequentemente sua capacidade de absorção de energia) conforme mostra a Figura 23, onde é exibido o número de dureza de Vickers (VHN, do inglês *Vickers Hardness Number*) obtido em amostras com diferentes níveis de degradação por impulsos atmosféricos.



Figura 23. VHN para MOV novo (A) e amostras degradadas a 20°C (B), 60°C (C) e 80°C(D), com nível crescente de degradação [43]

Uma das consequências da degradação do para-raios é o aumento da componente resistiva de sua corrente de fuga, o que intensifica o aquecimento pelo efeito Joule. Em MOVs com alto grau de degradação submetidos à tensão de operação, a dissipação de calor não é suficiente para compensar este aquecimento, o que intensifica o aumento da corrente de fuga. Estes efeitos se somam até que o para-raios entre em avalanche térmica, quando é estabelecido um curto-circuito fase-terra devido à alta condutividade dos varistores.

Entretanto, para-raios de distribuição instalados em campo possuem um desligador em série, cuja função é desconectar o para-raios do sistema quando houver uma corrente acima do esperado para seu funcionamento correto. Estes desligadores atuam por meio da explosão de compartimentos com pólvora ou, em projetos mais recentes, pela extensão de molas após a atuação de um elemento fusível [73].

Outro fenômeno observado durante o processo de degradação do MOV é a polarização da corrente de fuga. O diagrama de energia da Figura 16 mostra a fronteira entre dois grãos em uma situação de equilíbrio. Porém sob aplicação de um campo elétrico intenso, como uma descarga atmosférica, ocorre a polarização das bandas de energia devido à atração e repulsão das diferentes cargas. A emigração de elétrons do lado reversamente polarizado da DBS resulta na diminuição da energia do NF e aumenta a camada de depleção. Já no lado diretamente polarizado, este fenômeno tem efeito contrário: aumenta a energia do NF e diminui a camada de depleção, conforme mostra a Figura 24.



Figura 24. Diagrama de energia após a polarização da DBS. Adaptado de [15].

Caso não ocorresse a degradação do MOV, a tendência seria que as cargas voltassem ao equilíbrio após a descarga elétrica, com a DBS na disposição inicial mostrada na Figura 16. Porém, estudos constataram a polarização dos MOVs degradados, de forma que o aumento do pico negativo da corrente de fuga é superior ao aumento do pico positivo durante o processo de degradação [40, 74].

Isso sugere que após a polarização resultante do surto, o processo degradativo que ocorre na estrutura do MOV impede que as DBS retornem à situação de equilíbrio, de forma que o desbalanço mostrado na Figura 24 seja mantido. Acredita-se que este desequilíbrio de cargas seja causado pela migração permanente de íons devido ao forte campo elétrico resultante do surto atmosférico, o que gera o acréscimo de zincos intersticiais em um lado da barreira [74]

O surgimento de perfurações e trincas e a vaporização de componentes devido à descarga atmosférica faz com que ocorram descargas parciais no interior do corpo do varistor em operação, o que também foi apontado como causa da polarização dos varistores [27].

Desta forma, a altura da banda de energia do lado reversamente polarizado para que o elétron seja inserido na banda de condução é menor do que a do lado diretamente polarizado, o que resulta na diferença observada entre as componentes positiva e negativa da corrente de fuga.

A degradação de MOVs frente a descargas atmosféricas ocorre em função das seguintes variáveis [33]:

- Forma do impulso;
- Densidade de corrente através do resistor;
- Temperatura do resistor;

- Polaridade dos surtos;
- Número de descargas.

Com exceção da polaridade dos surtos (cujo efeito sobre varistores degradados por impulso não é claro), todos os outros tópicos interferem diretamente na energia total absorvida. Com esta consideração, MARTINEZ [33] descreve a evolução da corrente de fuga de um MOV conforme a Equação 34.

$$I_F(t) = I_{F_0} (1 + H_p \sqrt{t}) + I_a(t) + M I_{F_0}$$
(34)

Sendo:

- $I_F(t)$: Corrente de fuga para um instante de tempo [A]
- I_{F0} : Corrente de fuga inicial [A]
- H_p : Constante de proporcionalidade
- $I_a(t)$: Expressão para o decréscimo de corrente dos resistores mais recentes [A]
- M: Acréscimo de corrente devido à degradação frente a surtos

O problema neste ponto é a determinação do coeficiente ou expressão M que correlacione as descargas atmosféricas ou surtos de manobra com o aumento da corrente de fuga. Existem diversas variáveis nestas sobretensões que interferem diretamente sobre este coeficiente, como: amplitude, duração, temperatura inicial e intervalo entre aplicações. Algumas destas variáveis foram estudadas nos cenários propostos nesta tese, e espera-se que os resultados obtidos contribuam para a compreensão de como elas influenciam na degradação dos MOVs.

3. Procedimento Experimental

A análise da capacidade de absorção de energia dos MOVs neste trabalho foi feita por dois métodos. Primeiro, definiu-se por meio do MAD a suportabilidade das amostras a um único impulso. Em seguida, grupos de amostras foram submetidos a envelhecimento por impulsos de corrente sucessivos, de diferentes níveis de energia, para promover uma degradação gradual nos varistores.

Os efeitos degradativos dos impulsos foram avaliados por meio da análise da corrente de fuga entre as aplicações dos impulsos, em que foram observadas a potência dissipada e a distorção harmônica da corrente à MCOV, e a evolução dos picos resistivos da corrente de fuga a tensões de referência específicas. As amostras eram excluídas dos ensaios quando apresentavam falha durante a aplicação de impulso. O fluxograma da Figura 25 mostra as etapas do processo de envelhecimento de cada lote de 10 amostras.



Figura 25. Fluxograma do envelhecimento frente a impulsos sucessivos

3.1. Características dos varistores a ZnO utilizados neste trabalho

Neste trabalho foram utilizados varistores de $U_N = 3$ kV, MCOV = 2,55 kV, $I_N = 5$ kA, provenientes de três fabricantes distintos. As médias e desvios padrões das dimensões de um lote de 10 amostras destes varistores estão indicadas na Tabela 6, e um exemplar de cada fabricante está exposto na Figura 26.

	Alt	ura	Diân	netro	Vol	ume	Ma	ssa	Densidade		
Fab.	Fab. [mm]		[m	m]	[cr	n³]	[٤	g]	[g/cm ³]		
	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	Média	σ	
Α	21,35	0,055	30,90	0,078	16,01	0,073	87,71	0,28	5,479	0,034	
В	22,23	0,045	30,93	0,055	16,70	0,068	90,08	0,13	5,393	0,026	
С	21,15	0,013	29,92	0,092	14,87	0,093	80,86	0,42	5,438	0,049	

Tabela 6. Dimensões médias dos varistores utilizados neste trabalho



Figura 26. Amostra dos fabricantes A, B e C, respectivamente.

Observa-se que as amostras do fabricante B possuem maior volume do que as demais, enquanto as amostras do fabricante C possuem o menor volume e os maiores desvios padrões de volume, massa e densidade, o que significa maior heterogeneidade no processo de fabricação destes varistores.

3.2. Determinação do número de amostras por ensaio

Em conformidade com o prescrito em norma [71], foram utilizadas 15 amostras para cada condição analisada no MAD. Para os ensaios de envelhecimento gradual por impulsos, não há consenso quanto à quantidade ótima de amostras a serem utilizadas em estudos sobre degradação de varistores a ZnO, que variam desde 1 amostra por condição estudada até números superiores a 20 [11, 18]. Já a norma ABNT NBR 16050:2012 [38] define que sejam utilizadas até 3 amostras nos ensaios em para-raios completos.

Devido à quantidade de cenários avaliados e ao número disponível de amostras, foram utilizados 10 varistores para cada lote, número superior ao indicado para os ensaios conforme a norma pertinente e em conformidade com o utilizado por outros estudos de avaliação de degradação e capacidade de absorção de energia [34, 75].

3.3. Montagem Experimental e procedimentos para a caracterização elétrica

Os ensaios realizados nesta tese para a caracterização elétrica dos varistores foram as leituras de corrente de fuga a 60 Hz e a aplicação de impulsos de corrente com diferentes formas de onda, com amplitudes determinadas pela energia aplicada no impulso.

3.3.1. Leitura da corrente de fuga

O circuito do sistema utilizado para a análise da corrente de fuga é ilustrado na Figura 27.



Figura 27. Circuito para medição da corrente de fuga.

Os componentes numerados no circuito são:

- 1. Alimentação em 60 Hz;
- 2. Gerador de funções Tektronix AFG2021;
- 3. Amplificador de potência;
- 4. Transformador de potencial;
- 5. Amostra sob ensaio (conectada a atuador pneumático conforme Figura 28);
- 6. Resistor *shunt* de 1 k Ω para leitura da corrente de fuga;
- 7. Ponta de prova de alta tensão conectada a osciloscópio Tektronix DPO 4034B;
- 8. Ponta de prova de baixa tensão conectada ao osciloscópio supracitado;

O gerador de funções foi utilizado para garantir que o sinal de tensão aplicado estivesse livre de distorções harmônicas, com fator de forma igual a 1,0.

63

Os eletrodos utilizados para a leitura da corrente de fuga são conectados a um atuador pneumático, mostrado na Figura 28, para garantir a repetibilidade do contato elétrico nas leituras de corrente de fuga no decorrer da pesquisa.



Figura 28. Eletrodos para leitura da corrente de fuga

Para a análise da corrente de fuga foram determinados 3 valores de interesse, para os quais foram feitos os registros oscilográficos dos sinais de tensão e corrente. Estes valores são:

- Máxima tensão de operação contínua (MCOV);
- Tensões de referência (V_{ref}) para picos de componente resistiva de: 0,5 mA e 1,0 mA

Os valores de tensão de referência foram determinados nas amostras novas, antes que fossem submetidas a qualquer descarga. Foi utilizada uma amostra de referência em cada lote, que não foi submetida ao processo de degradação por impulsos. Assim, qualquer alteração nas tensões de referência desta amostra foi utilizada para a correção da tensão aplicada nos demais varistores, o que garante que as variações observadas nas leituras de corrente de fuga foram devidas unicamente à degradação das amostras pelos impulsos. O fator de correção a ser aplicado nas demais leituras, portanto, foi definido sobre a amostra de referência conforme a Equação 35.

$$fc = \frac{V_{ref_n}}{V_{ref_0}} \tag{35}$$

Sendo:

- *fc*: Fator de correção da tensão de referência;

- V_{refn} : Tensão de referência na leitura n;
- *V_{ref0}*: Tensão de referência na primeira leitura, nas amostras novas.

Conforme critério aceitável definido pela norma ABNT NBR 16050:2012 [38], o valor de crista da componente resistiva durante a leitura da corrente de fuga pode ser determinado diretamente do valor instantâneo do oscilograma da corrente no instante de pico do sinal da tensão, o que foi utilizado para a definição das tensões de referência das amostras novas.

A leitura da corrente de fuga na MCOV permite a análise dos varistores dentro da condição de operação para o qual foi projetado. Já as leituras a 0,5 mA representam o ponto em que normalmente o pico da componente resistiva da corrente de fuga supera o pico da componente capacitiva.

A leitura a 1,0 mA foi feita não só por representar o valor de referência normalmente utilizado em ensaios de para-raios e sugeridos em norma [38], mas também por apresentar variações detectáveis quando a amostra é envelhecida por impulsos de corrente [27].

3.3.2. Decomposição da corrente de fuga

Após a determinação da tensão de referência nas amostras (que deve ser feita durante a realização do ensaio e requer a consideração do pico resistivo em fase com o pico de tensão), os valores dos picos resistivos da corrente de fuga foram obtidos por meio da decomposição da corrente de fuga conforme o método proposto por ZHAO et. al. apresentado no item 2.4.1, implementado em MATLAB pelo autor. A Figura 29 exemplifica a decomposição de um sinal de corrente de fuga em suas componentes capacitiva e resistiva.



Figura 29. Ampliação do sinal aquisitado para a visualização da decomposição da corrente de fuga.

3.3.3. Aplicação de impulsos de corrente

Para a obtenção de impulsos de corrente exponenciais (de curta duração) de alta amplitude, um banco de capacitores conectados em paralelo é carregado até o valor desejado e descarregado sobre o equipamento ensaiado. Conforme o equacionamento de um gerador de impulsos [76], a relação entre a corrente obtida e a tensão aplicada é dada pela Equação 36.

$$U = Ri_m + L\frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i_m dt$$
(36)

Sendo:

- U: Tensão aplicada no impulso;
- R: Resistência do objeto ensaiado e do circuito;
- *C*: Valor do banco de capacitores;
- *i_m*: Corrente aplicada no impulso.

O Valor de L é obtido de acordo com a Equação 37.

$$L = L_0 + \frac{L_1}{n_1} + \frac{L_2}{n_1 n_2} \tag{37}$$

Sendo:

- *L*₀: indutância do caminho de descarga;
- *L*₁: indutância de cada estágio;
- *L*₂: indutância de cada capacitor;
- n_1 : número de estágios;
- n_2 : número de capacitores por estágio.

O circuito é dimensionado de modo que a relação entre suas resistências, capacitâncias e indutâncias obedeçam à relação da Equação 38.

$$\frac{R}{2} < \sqrt{L/C} \tag{38}$$

A corrente *i_m*, na Equação 36 é determinada pela Equação 39.

$$i_m = \frac{U}{\omega L} [exp(-\alpha t)] sen(\omega t)$$
(39)

Sendo α e ω dados pelas Equações (40) e (41), respectivamente.

$$\alpha = \frac{R}{2L} \tag{40}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \tag{41}$$

Por fim, a capacidade de energia *E* do circuito gerador de impulso é dada pela Equação 42.

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \tag{42}$$

O circuito em questão está ilustrado na Figura 30.



Figura 30 - Gerador de impulsos de corrente exponenciais

Neste circuito, a fonte carrega o banco de capacitores (C_1 a C_n) através do diodo retificador e do resistor limitador de corrente (R_{lim}). Quando a tensão nos capacitores atinge o valor desejado, o diodo retificador é aberto, de forma que a fonte seja desconectada do banco de capacitores e, através do centelhador, toda a carga nos capacitores é descarregada sobre a amostra ensaiada.

O indutor L_f atua diretamente na duração do impulso. A corrente obtida no impulso é então medida por um osciloscópio por meio do transformador de corrente *TC*, enquanto a tensão residual é obtida com o divisor de tensão capacitivo C_{div} .

As formas de onda definidas pela ABNT NBR 16050:2012 para impulsos de corrente exponenciais e utilizadas neste trabalho são:

- Impulso de corrente elevada: tempo de frente de 4 μ s \pm 0,5 μ s, tempo de cauda de 10 μ s \pm 10%;
- Impulso de corrente de descarga atmosférica: tempo de frente 8 μ s ± 1 μ s, tempo de cauda 20 μ s ± 10%;
- Impulso de manobra: tempo de frente compreendido entre 30 µs e 100 µs, tempo de cauda de aproximadamente duas vezes o tempo de frente.

Estes impulsos de corrente têm formato semelhante ao mostrado na Figura 31.



Figura 31. Parâmetros para determinação dos tempos de frente e cauda de impulsos de corrente exponenciais.

Sendo:

- *t*₀: Instante de início virtual da rampa de subida;
- t_{10} : Instante em que a corrente atinge 10% de seu valor de pico durante a rampa de subida;
- *t*₉₀: Instante em que a corrente atinge 90% de seu valor de pico durante a rampa de subida;
- t_{50} : Instante em que a corrente atinge 50% de seu valor de pico na cauda
- t_f : Tempo de frente, equivalente a 1,25 * $(t_{90} t_{10})$;
- t_c : Tempo de cauda; equivalente $t_{50} t_{0.}$

Para a obtenção das diferentes formas de onda foram utilizadas as seguintes configurações:

- Número de estágios: 9 (em todas as formas de onda);
- Capacitância por estágio: 1 μF (em todas as formas de onda, com dois capacitores de 2 μF conectados em série em cada estágio);

- Indutor *Lf* para definição da forma de onda:
 - \circ Impulso de corrente elevada (4/10 µs): sem indutor;
 - ο Impulso atmosférico (8/20 μs): 5,5 μH;
 - o Impulso de manobra (30/75 μ s): 100 μ H;

As formas de onda obtidas estão no ANEXO A. O gerador de impulsos do LAT-EFEI e seus componentes são mostrados nas Figuras 32 a 35.



Figura 32. Gerador de impulsos de corrente do LAT-EFEI, vista geral.



Figura 33. Fonte de tensão AC (A), resistor limitador de corrente (B) e diodo retificador (C).



Figura 34. Divisor capacitivo (A), TC de alta frequência (B), amostra sob ensaio (C) e gap (D).



Figura 35. Indutores para formas de onda $8/20 \ \mu s$ (A) e $30/75 \ \mu s$ (B).

Os impulsos foram aplicados individualmente, sem a utilização de colunas de varistores em série, para que fosse possível verificar a energia absorvida por cada amostra. Uma vez que a temperatura do varistor no instante da aplicação do impulso de corrente tem influência direta na sua degradação [43], todos os impulsos deste trabalho foram aplicados em amostras previamente aquecidas a 60 °C em forno. Para minimizar o resfriamento da amostra no intervalo entre sua retirada do forno e a aplicação do impulso, foram utilizados copos de nylon com eletrodos para o alojamento das amostras, que também eram aquecidos. As Figuras 36 e 37 mostram um exemplar destes copos aberto, para visualização dos eletrodos, e fechado, conforme permanecia durante a aplicação do impulso.



Figura 36. Copo de nylon, posição aberta



Figura 37. Copo de nylon, posição fechada.

O MAD foi realizado para a definição do valor de $E_{50\%}$ dos MOVs, isto é, a energia aplicada em um impulso para a qual há 50% de probabilidade de que um varistor novo falhe com uma única descarga. Uma vez que na aplicação dos impulsos a variável que se tem controle é a tensão no banco de capacitores, foi utilizada a Equação 42 para a definição dos valores de tensão de carga necessários para o degrau constante de energia, estabelecido em 400 J, referente a aproximadamente 5% da energia de carga esperada para a primeira falha.

No envelhecimento por impulsos, o primeiro nível de energia a ser aplicado foi definido como a energia necessária para submeter uma amostra do fabricante A a uma corrente de pico de três vezes sua corrente nominal na forma $8/20 \,\mu$ s, uma vez que tal condição promove níveis de degradação de varistores detectáveis por meio de leituras de corrente de fuga [40]. A energia obtida nesta condição foi 2,45 kJ, e a Tabela 7 mostra os valores de corrente de pico e tensão residual obtidos para este nível de energia nas três formas de onda avaliadas, para exemplificar a correlação entre as medidas.

Tabela 7. Corrente de pico e tensão residual para impulsos a 2,45 kJ em amostras do Fab. A

Forma de onda [µs]	Corrente de pico [kA]	Tensão residual [kV]	Energia [kJ]
4/10	25,3	15,5	2,45
8/20	15,0	12,8	2,45
30/75	4,83	9,2	2,45

Após a definição do primeiro nível de energia e os resultados obtidos no processo de degradação, foram definidos mais dois níveis de energia para intensificar o envelhecimento das amostras, determinados pelo acréscimo sucessivo de 1,0 kJ. Desta forma, os três níveis de energia utilizados para promover a degradação dos varistores neste trabalho foram 2,45 kJ, 3,45 kJ e 4,45 kJ.

No início de cada sequência de impulsos era feita uma aplicação sobre uma amostra de calibração, a fim de calcular a eficiência do circuito gerador de impulsos, conforme a Equação 43.

$$e = \frac{E_a}{E_C} \tag{43}$$

Sendo:

- *e*: Eficiência obtida durante a aplicação do impulso;
- E_a : Energia aplicada sobre a amostra;
- E_C : Energia carregada no banco de capacitores.

3.4. Aquisição e tratamento dos registros oscilográficos

Foi utilizado um osciloscópio Tektronix, modelo DPO 4034B para a aquisição de todos os sinais obtidos nesta pesquisa. Os oscilogramas obtidos foram registrados no formato *.csv* (do inglês *Comma Separated Values* – valores separados por vírgula, em tradução livre). Neste formato, são registrados em um arquivo de texto todos os pontos de tempo, tensão e corrente da janela de aquisição, o que permite não somente que sejam geradas as imagens dos sinais obtidos, mas também que sejam feitos tratamentos e operações matemáticas sobre eles.

Os sinais de corrente de fuga foram aquisitados em uma janela de medição de 100 ms, a uma frequência de amostragem de 10 kHz. Após a aquisição dos dados, os vetores salvos em *.csv* foram tratados e analisados com códigos específicos desenvolvidos pelo autor na plataforma MATLAB, conforme fluxograma da Figura 38.


Figura 38. Fluxograma do tratamento dos sinais de corrente de fuga.

Para os sinais de impulso, optou-se por janelas de medição nas quais o impulso correspondesse a aproximadamente 20% da janela, de forma a evidenciar a falha de um varistor durante uma aplicação de impulso, conforme exemplificado nas Figuras 39 e 40. A energia total aplicada nos impulsos foi obtida diretamente no osciloscópio, que fornece a área sob a curva da potência.



Figura 39. Exemplo de impulso 4/10 µs sem falha do varistor.



Figura 40. Exemplo de impulso $4/10 \ \mu s$ com falha do varistor.

A falha do varistor na Figura 40 ocorre aproximadamente no instante equivalente a 8×10^{-5} s, a partir do qual os sinais de tensão e corrente se tornam oscilatórios, divergindo do comportamento observado na Figura 39.

4. Análise dos resultados experimentais

Neste capítulo são analisados primeiramente os resultados obtidos diretamente da aplicação dos impulsos de corrente, tanto no MAD, para a verificação da capacidade de absorção de energia a uma única descarga, quanto nos impulsos sequenciais, para a avaliação do processo de degradação dos varistores.

Também são apresentados os resultados das leituras de corrente de fuga ao longo do processo de envelhecimento, com a análise da potência dissipada pelas amostras, dos picos resistivos da corrente de fuga e das distorções harmônicas dos sinais de corrente na MCOV. Os resultados obtidos para cada fabricante são sobrepostos para comparação das diferenças de desempenho.

Por fim, encerra-se o capítulo com a discussão dos resultados apresentados e com a proposta de um método de tempo e custo reduzidos para a comparação de varistores de diferentes fabricantes.

4.1. Método dos acréscimos e decréscimos

As tabelas obtidas com a realização do MAD estão expostas no ANEXO A, e os valores obtidos para $E_{50\%}$ e desvio padrão, calculados conforme as Equações 31 e 32, respectivamente, estão expostos na Tabela 8. A Figura 41 mostra o gráfico que relaciona os valores de $E_{50\%}$ e o tempo de cauda das formas de onda.

Fabricante	Forma de onda	<i>E50%</i> [kJ]	σ [kJ]
	4/10 µs	10,15	0,24
А	8/20 μs	8,83	0,23
	30/75 µs	7,98	0,21
В	4/10 µs	10,52	0,33
	8/20 μs	9,03	0,35
	30/75 µs	8,19	0,27
	4/10 µs	9,83	0,27
С	8/20 μs	8,24	0,20
	30/75 µs	7,76	0,21

Tabela 8. E50% e desvio padrão.



Figura 41. E_{50%} x Tempo de cauda, MAD.

A curva que melhor aproxima os pontos no intervalo de tempo estudado, com a correlação entre $E_{50\%}$ (em kJ) e o tempo de cauda t_c (em µs), é expressa pela Equação 44. As constantes obtidas na aproximação de cada fabricante estão na Tabela 9, bem como os coeficientes de correlação R^2 de cada curva.

$$E_{50\%} = 64,98 \times t_c^{-1,448} + c \tag{44}$$

Tabela 9. Coeficientes: curva relativa à $E_{50\%}$.

Fab.	С	R ²	
Α	7,890	0,9947	
В	8,150	0,9960	
С	7,513	0,9873	

Observa-se uma relação inversa entre a duração do impulso e o valor de $E_{50\%}$, uma vez que as amostras submetidas à forma de onda mais curta suportaram maiores valores de energia do que aquelas submetidas ao impulso mais longo. Além disso, o valor da constante *c* na Equação 44 é diretamente proporcional ao desempenho de cada fabricante.

De acordo com a Equação 33, o aquecimento das amostras nos impulsos mais curtos foi mais intenso (devido à maior energia total suportada) e mais rápido (devido à menor duração do impulso). Entretanto, mesmo com menores valores de temperatura final e de taxa de aquecimento, as amostras submetidas a impulsos mais longos apresentaram pior desempenho na suportabilidade a impulso único.

Nenhum dos varistores apresentou danos severos à sua integridade física macroscópica (trinca, fragmentação ou perfuração). A geometria dos varistores aliada à curta duração dos impulsos torna improvável a ocorrência de falhas que não sejam por *flashover*, para as quais a duração da sobretensão é fator crítico [77, 78]. A Figura 42 mostra um exemplo dos sinais de carbonização presentes na lateral dos varistores decorrente da falha no MAD.



Figura 42. Sinal de carbonização na superfície lateral de um varistor do Fabricante A.

4.2. Envelhecimento por impulsos de corrente

A Tabela 10 mostra o número de impulsos necessários para encerrar cada lote no método de envelhecimento por impulsos de corrente. Este número é definido como $N_{50\%}$, uma vez que os lotes foram encerrados após a ocorrência de falha em metade das amostras.

Energia	Forma de	Fabricante		
[kJ]	onda [µs]	Α	В	С
	4/10	36	44	32
2,45	8/20	29	28	25
	30/75	23	22	13
3,45	4/10	22	25	15
	8/20	19	18	11
	30/75	12	13	8
4,45	4/10	12	14	7
	8/20	10	11	5
	30/75	7	7	3

Tabela 10. Número de impulsos aplicados até o encerramento dos lotes.

As Figuras 43 a 45 mostram os resultados obtidos para $N_{50\%}$, com a adição do ponto de $E_{50\%}$ para um único impulso.



Figura 43. Energia x N_{50%}, Fabricante A.



Figura 44. Energia x N_{50%}, Fabricante B.



Figura 45. Energia x N_{50%}, Fabricante C.

O número de aplicações de impulso até o encerramento de cada lote apresentou um padrão claro: foi inversamente proporcional à duração dos impulsos para todos os fabricantes analisados. Este padrão apresenta conformidade com o resultado obtido no MAD, em que as amostras submetidas a impulsos mais curtos suportaram níveis de energia maiores do que aquelas submetidas a impulsos mais longos. Este fato indica que o tempo em que o MOV permanece submetido à sobretensão entre seus terminais é mais crítico do que a corrente de pico do impulso para a capacidade de absorção de energia frente a impulsos de corrente.

A similaridade qualitativa no comportamento das amostras dos três fabricantes pode ser observada por meio da sobreposição dos resultados exibida na Figura 46, com o eixo referente ao número de impulsos em escala logarítmica.



Figura 46. Energia x $N_{50\%}$, sobreposição dos três fabricantes.

Observa-se que o Fabricante B tem um desempenho discretamente melhor do que o Fabricante A, enquanto o Fabricante C tem um desempenho significativamente pior que os demais. Este resultado indica uma influência direta do volume do varistor na sua capacidade de absorção de energia.

A relação entre a energia e o número de impulsos para todos os fabricantes pode ser aproximada por uma reta quando se define o número de impulsos em escala logarítmica. As aproximações foram realizadas em MATLAB, e as retas exibidas na Figura 46 são definidas pela Equação 45:

$$E = k - b \times \ln(N_{50\%}) \tag{45}$$

Sendo:

- E: energia, em kJ;

- k: constante de deslocamento da curva;

- *b*: constante de inclinação da curva.

Os valores de *b* obtidos nas aproximações dos resultados de cada forma de onda são mostrados na Tabela 11, e são inversamente proporcionais à duração da forma de onda.

Forma de onda	b
4/10 µs	2,134
8/20 μs	1,794
30/75 μs	1,773

Tabela 11. Valor de b para cada forma de onda.

Os valores de k, b e do coeficiente de correlação R^2 obtidos são mostrados na Tabela 12.

Fabricante	Forma de onda	k	b	R^2
А	4/10 µs	10,01	2,134	0,9973
	8/20 µs	8,659	1,794	0,9971
	30/75 µs	7,936	1,773	0,9991
В	4/10 µs	10,36	2,134	0,9967
	8/20 µs	8,711	1,794	0,9925
	30/75 µs	8,005	1,773	0,9973
С	4/10 µs	9,377	2,134	0,9678
	8/20 µs	7,768	1,794	0,9752
	30/75 µs	7,046	1,773	0,9478

Tabela 12. Coeficientes obtidos na aproximação das curvas de E x N.

Observa-se pela Equação 45 que há uma relação direta entre k e $E_{50\%}$, uma vez que E = k para um único impulso (condição avaliada pelo MAD). A Tabela 13 mostra a diferença percentual entre estes valores.

Tabela 13. Comparação entre k e E_{50%}.

Fabricante	Forma de onda	k	$E_{50\%}$	%
А	4/10 µs	10,01	10,15	1,40
	8/20 µs	8,659	8,83	1,97
	30/75 µs	7,936	7,98	0,55
В	4/10 µs	10,36	10,52	1,54
	8/20 µs	8,711	9,03	3,66
	30/75 µs	8,005	8,19	2,31
С	4/10 µs	9,377	9,83	4,83
	8/20 µs	7,768	8,24	6,08
	30/75 µs	7,046	7,76	10,13

Desta forma, a Equação 45 pode ser reescrita conforme a Equação 46.

$$E = E_{50\%} - b \times \ln(N_{50\%}) \tag{46}$$

Portanto o número de impulsos que represente uma probabilidade de 50% de falha de um varistor nas formas de onda avaliadas neste trabalho pode ser estimado com a Equação 47.

$$N_{50\%} = e^{\frac{E - E_{50\%}}{-b}} \tag{47}$$

O fato predominante das falhas em todas as formas de onda foi o surgimento de marcas nas superfícies laterais das amostras conforme mostra a Figura 47.



Figura 47. Marcações laterais em amostras dos fabricantes A, B e C, respectivamente.

Isso indica que a concentração de corrente nas extremidades das amostras devido ao efeito pelicular tem relação direta com a degradação das amostras submetidas a envelhecimento por impulsos de corrente, e o avanço do processo de degradação favorece a formação de *hotspots* próximo à superfície lateral do varistor [79]. Isso resulta na falha dos varistores após a aplicação de certo número de descargas, que se manifesta tanto nos registros oscilográficos (conforme exemplo apresentado na Figura 40) quanto nas marcas na superfície lateral das amostras.

4.3. Avaliação da corrente de fuga

Foram analisados os resultados das leituras dos picos resistivos da corrente de fuga às tensões de referência para 0,5 mA e 1,0 mA, além da potência consumida e das componentes harmônicas da corrente lida à MCOV.

Os pontos plotados nos gráficos das Figuras 49 a 82 correspondem às médias das leituras das amostras de cada lote, enquanto as curvas representam a melhor aproximação obtida para

cada conjunto de pontos com a ferramenta *Curve Fitting*, do MATLAB. A função "*Y*" que mais se adequou aos resultados com relação ao número "*x*" de impulsos foi a função exponencial de 2 termos, conforme Equação 48:

$$Y(x) = a \times e^{b \times x} + c \times e^{d \times x}$$
⁽⁴⁸⁾

A Figura 48 mostra um exemplo da aplicação da ferramenta para a obtenção dos parâmetros da curva conforme Equação 48 para as leituras do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à tensão de referência de 1,0 mA de amostras do fabricante A envelhecidas por impulsos de 4,45 kJ à forma de onda 4/10 µs.



Figura 48. Tela da ferramenta Curve Fitting, do MATLAB.

4.3.1. Picos resistivos da corrente de fuga

Os gráficos para a análise da evolução do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga, em módulo, nas tensões de referência para 0,5 mA e 1,0 mA, são exibidas nas Figuras 49 a 54, com os resultados obtidos para as amostras dos fabricantes A, B e C, respectivamente.



Figura 49. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante A.



Figura 50. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA, fabricante A.



Figura 51. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante B.



Figura 52. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA, fabricante B.



Figura 53. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante C.



Figura 54. Pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA, fabricante C.

Todas as condições de degradação impostas aos varistores resultaram no aumento do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga. Observa-se que em impulsos de mesma forma de onda, a variação da corrente de fuga é diretamente proporcional à energia aplicada nos impulsos. Os resultados também indicam que impulsos com formas de onda mais curta causam mais variação no valor lido, apesar das amostras suportarem mais impulsos do que nas formas de onda mais longas.

As Figuras 55 a 60 mostram os valores medidos para o pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga.



Figura 55. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante A.



Figura 56. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante A.



Figura 57. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante B.



Figura 58. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA, fabricante B.



Figura 59. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 0,5 mA, fabricante C.



Figura 60. Pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} de 1,0 mA, fabricante C.

Diferentemente do observado para o pico negativo da componente resistiva, a evolução das curvas de pico positivo não apresentou um padrão evidente de aumento em todas as análises. Foram observados casos em que há uma redução do valor da corrente após um aumento inicial, como pode ser observado para as amostras envelhecidas a impulsos de 4,45 kJ em 4/10 µs do Fabricante B, como mostram as Figuras 57 e 58.

Não foram encontrados relatos da redução do pico positivo da componente resistiva da corrente de fuga devido à aplicação de impulsos em outros trabalhos. Acredita-se que a migração de íons durante o processo de polarização dos varistores possa resultar em um desequilíbrio das bandas de condução que explique esta redução [15, 22], entretanto mais investigações são necessárias para a compreensão das razões por trás deste fenômeno.

Assim, os resultados obtidos indicam que a variação do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga é um melhor indicativo da evolução da degradação dos varistores do que o pico positivo, para o qual a curva de evolução com o número de descargas não é monótona crescente.

4.3.2. Potência consumida à MCOV

Os gráficos com a evolução da potência consumida à MCOV estão apresentados nas Figuras 61 a 63.











Figura 63. Potência dissipada à MCOV, fabricante C.

Observa-se que houve aumento da potência consumida à MCOV em todas as condições de envelhecimento aplicadas. De forma semelhante às analises anteriores, as amostras submetidas a impulsos mais curtos apresentaram maiores valores de potência consumida.

4.3.3. Componentes harmônicas à MCOV

Os gráficos com a evolução das componentes harmônicas ímpares obtidos nas leituras à MCOV ao longo do processo de degradação são mostrados nas Figuras 64 a 67, com os resultados do Fabricante A para o 3°, 5°, 7° e 9° harmônicos.



Figura 64. Terceiro harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A.



Figura 65. Quinto harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A.



Figura 66. Sétimo harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A.



Figura 67. Nono harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante A.

Os resultados mostram o aumento da intensidade das componentes harmônicas analisadas com o avanço do processo de degradação. De forma semelhante ao observado para o pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga, as amostras submetidas a impulsos mais curtos também apresentaram maiores variações do que aquelas envelhecidas por impulsos mais longos. Os resultados obtidos para os fabricantes B e C são mostrados nas Figuras 68 a 75, e possuem as mesmas tendências que as observadas para o fabricante A.



Figura 68. Terceiro harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B.



Figura 69. Quinto harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B.



Figura 70. Sétimo harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B.



Figura 71. Nono harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante B.



Figura 72. Terceiro harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C.



Figura 73. Quinto harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C.



Figura 74. Sétimo harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C.



Figura 75. Nono harmônico da corrente de fuga à MCOV, fabricante C.

4.4. Comparação entre fabricantes

A comparação da corrente de fuga entre os fabricantes foi feita por meio dos resultados obtidos nos cenários que causam mais variação ($4/10 \ \mu s$, $4,45 \ kJ$) e menos variação ($30/75 \ \mu s$, 2,45 kJ). A Figura 76 mostra os resultados para a potência dissipada à MCOV.



Figura 76. Comparação da potência dissipada à MCOV.

Observa-se que as amostras do fabricante B apresentam maior potência consumida quando novas do que os demais. Entretanto, logo após o primeiro impulso à condição de máxima variação as amostras do fabricante C passam a consumir mais potência à MCOV, comportamento que permanece até o fim do lote.

No cenário de mínima variação, as amostras do fabricante C passaram a consumir mais potência que aquelas do fabricante A a partir do quarto impulso, mas falharam antes que a leitura ultrapassasse aquelas do fabricante B.

As leituras do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga, em módulo, são exibidas nas Figuras 77 e 78. Logo após o primeiro impulso já é possível observar a diferença entre os fabricantes, que se mantém até o fim dos lotes.



Figura 77. Comparação do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} para 0,5 mA.



Figura 78. Comparação do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga à V_{REF} para 1,0 mA.

A comparação dos resultados obtidos para as componentes harmônicas do sinal de corrente de fuga à MCOV está feita nas Figuras 79 a 82. Observa-se que para as distorções harmônicas, as amostras do fabricante B, que obtiveram os melhores resultados na capacidade de absorção de energia frente a impulsos de corrente, apresentaram menores intensidades do que as demais.

Entretanto, as amostras do fabricante C (que apresentaram o pior desempenho nos ensaios de impulso) precisaram de aproximadamente cinco descargas para que suas intensidades de 3° e 5° harmônicos fossem maiores do que aquelas do fabricante A. Para o cenário de mínima variação do 7° harmônico, isso ocorreu apenas no décimo impulso, enquanto na análise do 9° harmônico os valores se mantiveram próximos no cenário de máxima variação, mas com melhor desempenho do fabricante C no cenário de mínima variação.



Figura 79. Comparação do 3º harmônico da corrente de fuga à MCOV.



Figura 80. Comparação do 5° harmônico da corrente de fuga à MCOV.



Figura 81. Comparação do 7º harmônico da corrente de fuga à MCOV.



Figura 82. Comparação do 9° harmônico da corrente de fuga à MCOV.

4.5. Discussão dos resultados

Quanto aos fabricantes analisados, o fabricante B obteve melhor resultado em três análises: $E_{50\%}$, $N_{50\%}$ e distorções harmônicas à MCOV. O desempenho nos ensaios sob impulso apresentou relação direta com o volume dos varistores, em que os varistores de maior volume obtiveram melhores resultados. Em contrapartida, as amostras do fabricante A apresentaram menores aumentos de pico resistivo da corrente de fuga e de potência consumida à MCOV. As amostras do fabricante C apresentaram o pior desempenho geral nas análises realizadas, o que pode estar relacionado não somente ao menor volume destes varistores, mas também à maior heterogeneidade das suas medidas, que indicam um processo de fabricação de menor qualidade.

Existem relatos de menores valores de capacidade de absorção de energia por volume do varistor do que os resultados encontrados neste trabalho. HE et. al [34] constataram que a capacidade de absorção de energia por volume é menor para varistores de maior diâmetro. Entretanto, enquanto em seu trabalho amostras com razão h/d de 0,19 tiveram uma capacidade média de absorção de energia por volume de 322 J/cm³ para impulso a 8/20 μ s, as amostras do Fabricante C, de pior desempenho nesta pesquisa, apresentaram um $E_{50\%}$ de 540 J/cm³ com uma razão h/d de 0,71.

Por serem varistores de fabricantes distintos, nenhuma afirmação pode ser feita sobre a relação entre a razão h/d e a capacidade de absorção de energia por volume com apenas estes resultados, entretanto a diferença observada aponta para uma possível relação direta entre estas medidas. A validade da premissa de que varistores de maior razão h/d possuem mais capacidade de absorção de energia deve ser verificada com varistores de mesmo fabricante.

A ocorrência de danos físicos na superfície lateral das amostras é um efeito conhecido da degradação de varistores por impulsos de corrente [79]. Entretanto, as amostras deste trabalho não apresentaram fragmentações completas, e as falhas foram observadas nas superfícies laterais das amostras por marcas de carbonização e quebra de uma pequena porção da cobertura isolante. Existem relatos de fragmentação mais severa de varistores em estudos com a aplicação de impulsos de corrente com varistores com razão h/d até 0,31 [34, 75], o que indica que maiores razões h/d resultam em melhor resistência mecânica ao estresse térmico do aquecimento Joule repentino durante os impulsos.

Com exceção do pico positivo da componente resistiva, todas as análises da corrente de fuga apresentaram tendências claras de aumento com o processo de degradação dos varistores.

Observa-se que há relação direta entre a energia aplicada e a degradação, de forma que maiores energias à mesma forma de onda resultam em maiores variações na corrente de fuga.

Entretanto, enquanto formas de onda mais longas foram mais críticas para a suportabilidade a impulsos, foram os impulsos mais curtos que resultaram em maior variação da corrente de fuga na avaliação de amostras envelhecidas à mesma energia. Isto indica que, embora o tempo sob tensão tenha sido fator determinante para a falha das amostras nos impulsos, as variações da corrente de fuga estão diretamente relacionadas à corrente aplicada às amostras.

Ao se considerar o para-raios instalado em rede, a maior variação da potência consumida à MCOV observada em impulsos mais curtos pode resultar em um incremento de temperatura que faça com que os varistores excedam o limite de estabilidade e entrem em avalanche térmica. Ou seja, enquanto formas de onda mais longas são mais críticas para a suportabilidade a impulso quando analisadas separadamente, formas de onda mais curtas podem ser mais críticas em um cenário de operação do para-raios.

Com isto, há um dilema quanto à definição do nível de degradação de amostras envelhecidas por impulsos de mesma energia a diferentes formas de onda. Caso a definição de degradação seja relacionada à "condição que resulta em maiores variações na corrente de fuga", a conclusão é que formas de onda mais curtas degradam mais intensamente os varistores do que formas de onda mais longas. Entretanto, caso a degradação seja relacionada à "condição em que sejam necessários menos impulsos para a falha do varistor", conclui-se que formas de onda mais longas são mais críticas.

Com os resultados obtidos, os seguintes comentários são feitos quanto à elaboração de um modo de comparação de desempenho entre diferentes fabricantes:

- Apesar de ter sido observada uma relação direta entre o volume do varistor e sua capacidade de absorção de energia, não se pode assumir que esta relação será verdadeira em todas as comparações entre varistores de diferentes fabricantes devido às possíveis diferenças na qualidade do material utilizado e no processo de fabricação.

- Os resultados obtidos indicam que há relação direta entre a capacidade de absorção de energia a um único impulso e a múltiplos impulsos, conforme Figura 41 e Equação 45. Desta forma, para as formas de onda e níveis de energia considerados neste trabalho, o MAD pode

ser utilizado para comparar o desempenho de varistores de diferentes fabricantes a longo prazo, o que reduz o tempo necessário para a realização dos ensaios elétricos.

- As variações nas leituras da corrente de fuga são mais intensas na forma de onda 4/10 μs. Os resultados indicam que as diferenças entre os comportamentos da corrente de fuga a longo prazo dos fabricantes ficam evidenciados após o primeiro impulso nas leituras da potência consumida à MCOV e do pico negativo da componente resistiva da corrente de fuga. Entretanto, o fabricante de melhor desempenho nos impulsos não foi o que apresentou menores variações nestas leituras.

- A análise da evolução do 3° harmônico da corrente de fuga lida à MCOV indica que após 5 impulsos é possível observar a tendência do comportamento a longo prazo entre diferentes fabricantes. Os resultados obtidos tiveram relação direta com os resultados dos ensaios de impulso, de forma que os fabricantes de melhor desempenho nos impulsos apresentaram menores intensidades de 3° harmônico.

O método desenvolvido nesta tese pode ser aplicado de forma reduzida para a comparação de fabricantes conforme as seguintes sugestões:

1) MAD em um lote de 15 varistores em qualquer das três formas de onda utilizadas nesta tese.

2) Aplicação de cinco impulsos na forma 4/10 μ s, a uma energia específica de 1,75 kJ/kV_{MCOV} (equivalente aos impulsos de 4,45 kJ nas amostras desta tese, cuja MCOV é 2,55 kV, conforme Equação 30), em um lote de 10 amostras, intercalados à leitura da corrente de fuga à MCOV e na V_{REF} de 1,0 mA para a verificação da potência dissipada e 3º harmônico à MCOV e da evolução do pico resistivo da corrente de fuga à tensão de referência.

O objetivo destas sugestões não é substituir os ensaios definidos em norma, mas apresentar método alternativo, mais rápido, e de menor custo, para que diferentes fabricantes de varistores sejam comparados nas etapas iniciais de desenvolvimento de projeto de para-raios. Desta forma, somente os para-raios fabricados com os varistores do fornecedor escolhido terão que passar por todos os ensaios previstos em norma. Contribui-se assim para a melhoria da qualidade do produto final, o que pode levar à redução das falhas de para-raios instalados em campo e beneficiar não só as companhias de energia elétrica, mas a sociedade como um todo.

5. Considerações finais

Os efeitos de diferentes formas de onda de curta duração na capacidade de absorção de energia de varistores a ZnO foram investigados neste trabalho, que envolveu a realização de aproximadamente 3500 aplicações de impulsos de corrente e leituras de corrente de fuga.

Os resultados do MAD indicam maior capacidade de absorção de energia para formas de onda mais curtas. De forma semelhante, o envelhecimento por impulsos de corrente mostrou que as amostras também suportam mais impulsos à mesma energia nas formas de onda mais curtas. Ambos os resultados indicam que, para as amostras e formas de onda estudadas neste trabalho, o tempo sob tensão é mais crítico à falha por impulsos do que o valor de pico da corrente. Entretanto, as maiores correntes de pico a impulsos de menor duração resultam em mais variação nas variáveis analisadas na corrente de fuga.

Foram observadas marcas nas laterais das amostras que falharam em ambos os métodos, o que sugere que as falhas observadas no MAD são causadas por *flashover*, enquanto a formação de caminhos condutivos próximo à superfície lateral dos varistores é responsável pela falha no processo de degradação. A relação entre a energia aplicada e o número de impulsos para uma probabilidade de falha do varistor de 50% é dada por uma função logarítmica para as formas de onda e níveis de energia estudadas neste trabalho.

Os resultados obtidos são qualitativamente semelhantes para as amostras de todos os fabricantes, o que elimina a possibilidade dos resultados serem enviesados pelo comportamento das amostras de um único fornecedor. Quantitativamente, foram observados diferentes resultados entre os fabricantes, o que possibilita a comparação de desempenho para a escolha do melhor fornecedor de varistor para a fabricação de para-raios.

Estudos em varistores de diferentes razões entre altura e diâmetro, submetidos às mesmas densidades energéticas utilizadas neste trabalho, devem ser conduzidos para verificar a influência das dimensões das amostras nos resultados obtidos. Por fim, outros métodos de avaliação devem ser pesquisados na busca por uma variável que seja diretamente proporcional aos efeitos da forma de onda sobre a capacidade de absorção de energia dos varistores, ou seja, que apresente maior aumento para formas de onda em que a amostra suporte menos impulsos.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Salustiano, T. A. Nogueira, A. A. A. de Queiroz, E. T. W. Neto, C. de Salles, I. C. Tavares e J. M. Campos, "Artificial Rain Accelerated Aging Test of HDPE Pin Insulators for Medium Voltage Distribution in Brazil," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, nº 4, pp. 2483-2492, 2017.
- J. M. Filho, Manual de Equipamentos Elétricos Terceira Edição, Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2005.
- [3] L. B. Moraes, G. P. Lopes, A. Violin, E. T. W. Neto, A. Piantini, G. M. F. Ferraz, R. M. Capelini e R. Salustiano, "Assessment of lightning overvoltages on lines with different voltages sharing the same structures," em *International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, Natal, Brasil, 2017.
- [4] G. H. Faria, G. P. Lopes, T. C. Rodrigues, E. T. W. Neto, T. A. Nogueira e M. P. Pereira, "Lightning Withstand of Medium Voltage Switches and Cut-Out Fuses Considering Standard and Nonstandard Impulse Shapes," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, nº 4, pp. 47-55, 2020.
- [5] V. Hinrichsen, "Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems - Fundamentals," *Siemens*, nº 3, 2012.
- [6] M. L. B. MARTINEZ e R. Vaisman, "Para-raios," em Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas, Brasília, Teixeira, 2013, pp. 414-477.
- [7] P. Possima, Stability of Zinc Oxide Varistors Tese submetida à University of Manchester para obtenção do título de Doutor em Ciências Físicas e de Engenharia, 2014.
- [8] J. Sato e C. Dennyson, "Zinc Oxide Can it Survive New Sunscreen Test Protocols Alone," *The australian Journal of Cosmetic Science*, nº Junho, pp. 32-35, 2011.

- [9] F. L. Roth e R. D. Stiehler, "Standard Materials for Rubber Compounding," *National Bureau of Standards*, vol. 25, pp. 232-236, 1955.
- [10] M. Matsuoka, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 10, nº 6, pp. 736-746, 1971.
- [11] H. H. Hng e P. L. Chan, "Effects of MnO2 Doping in V2O5-doped ZnO Varistor System," *Materials Chemestry and Physics*, vol. 75, pp. 61-66, 2002.
- C. W. Nahm, "Effect of MnO2 Addition on Microstructure and Electrical Properties of ZnO-V2O5-based Varistor Ceramics," *Ceramisc International*, vol. 35, pp. 541-546, 2009.
- [13] J. D. Levine, "Theory of varistor electronic properties," *Critical REviews in Solid State Sciences*, vol. 5, nº 4, pp. 597-608, 2013.
- [14] J. Bernasconi, S. Strässler, B. Knecht, H. P. Klein e A. Menth, "Zinc Oxide Based Varistors: a Possible Mechanism," *Solid State Communications*, vol. 21, pp. 867-870, 1977.
- [15] M. A. Alim, S. Li, F. Liu e P. Cheng, "Electrical Barriers in the ZnO Varistor Grain Boundaries," *Physica Status Solidi*, vol. 203, nº 2, pp. 410-427, 2006.
- [16] M. Khodsuz e M. Mirzaie, "Evaluation of Ultraviolet ageing, pollution and varistor degradation effects on harmonic contens of surge arrester leakage current," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 9, n° 8, pp. 979-986, 2015.
- [17] S. Tominaga, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, M. Imataki e T. Nitta, "Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters," *IEEE Transactions* on Power Apparatus and Systems, vol. 99, nº 4, pp. 1548-1556, 1980.
- [18] W. Shiliang e X. Yuchun, "An experimental investigation on the degradation mechanism of ZnO varistors," em *Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report*, Amherst, Estados Unidos da América, 1985.

- [19] A. Vicaud, "A. C. Voltage Ageing of Zinc Oxide Ceramics," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2, nº 1, pp. 49-58, 1986.
- [20] Z. Meirong, L. Fuyi e L. Ziyu, "Studies on Degradation of ZnO Varistor Under Impulse Stress by Thermally Stimulated Current," em Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tóquio, Japão, 1991.
- [21] Y. P. Tu, Q. Wang, J. He, X. Li e L. J. Ding, "TSC characteristics of AC aged ZnO varistors," *Science China - Technological Sciences*, vol. 56, nº 3, pp. 677-682, 2013.
- [22] C. M. Barrado, E. R. Leite, P. R. Bueno, E. Longo e J. A. Varela, "Thermal conductivity features of ZnO-based varistors using the laser-pulse method," *Materials Science and Engineering A*, vol. 371, pp. 377-381, 2004.
- [23] H. Jinliang, H. Jun e C. Qingheng, "Microstructure Simulation on Puncturing Phenomenon of ZnO Varistor under High Current," em IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials, Bali, Indonésia, 2006.
- [24] L. Shengtao, C. Pengfei, L. Jianying e Z. Lei, "Investigation on Defect Structure in ZnO Varistor Ceramics by Dielectric Spectra," em *International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, Reino Unido, 2007.
- [25] H. Jin-Liang e H. Jun, "Discussions on Nonuniformity of Energy Absorption Capabilities of ZnO Varistors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 222, nº 3, pp. 1523-1532, 2007.
- [26] C. A. Christodoulou, M. V. Avgerinos, L. Ekonomou, I. F. Gonos e I. A. Stathopulos, "Measurement of the resistive leakage current in surge arresters under artificial rain test and impulse voltage subjection," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 3, nº 3, p. 256.262, 2009.
- [27] C. de Salles, M. L. B. Martinez e A. A. A. de Queiroz, "Ageing of Metal Oxide Varistors due to Surges," em *International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*, Fortaleza, Brasil, 2011.

- [28] W. A. M. Ursine, J. L. Silvino, L. G. Fonseca e R. M. de Andrade, "Metal-Oxide Surge Arrester's Leakage Current Analysis and Thermography," em *International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, Belo Horizonte, Brasil, 2013.
- [29] 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.
- [30] A. M. Zulkurnain, A. H. Khavari, C. L. Wooi, M. Moradi e A. Naderipour,
 "A Review of Modeling Ageing Behaviour and Condition Monitoring of Zinc
 Oxide Surge Arrester," em *IEEE Student Conference on Research and Development*, 2014.
- [31] H. Yuwei, F. Zhengcai e C. Jian, "Investigation of the Effects of Multiwaveform Multi-pulse Impulse Currents on MOV for Class I SPD Through Operating Duty Tests," em *International Conference on Lightning Protection*, Estoril, Portugal, 2016.
- B. Szafraniak, M. Bonk, L. Fusnik e P. Zydron, "Influence of High Current impulses and 50 Hz AC Bursts on the Temperature of Low-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters," em *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Koscielisko, Polônia, 2018.
- [33] M. L. B. Martinez, Capacidade de Absorção de Energia de Resistores a Óxido Metálico - considerações Teóricas e Métodos de Avaliação. Tese submetida à EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica., 1998.
- [34] J. L. He e J. Hu, "Discussions on Nonuniformity of Energy Absorption Capabilities of ZnO Varistors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, n° 3, pp. 1523-1532, 2007.
- [35] W. Li, X. Yao, J. Sun, Q. Li, H. Wang e X. Zhu, "Comparison with the influence of different types of impulse currents on the degradation of Zinc-oxide

varistors," em IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, 2020.

- [36] Q. Zhou, X. Huang, B. Wei e L. Ye, "Impulse Life Evaluation Method of MOV Based on Weibull Distribution," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 34818-34828, 2021.
- [37] E. T. W. Neto, M. L. B. Martinez, A. M. M. Diniz, C. de Salles, J. A. Pallaro e H. R. P. M. Oliveira, "Feasibility for the Utilization of 5 kA Distribution Arresters," em *International Symposium of Lightning Protection (XI SIPDA)*, Fortaleza, Brasil, 2011.
- [38] Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 16050:2012 -Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada.
- [39] A. J. Wurts, "Lightnin Arresters, and the discovery of non-arcing metals," em 65th Meeting of the American Institute of Electrical Engineers, Nova York, EUA, 1892.
- [40] C. de Salles, Modo de Envelhecimento Frente a Impulsos de Curta Duração - Impulsos atmosféricos em Resistores não Lineares a Óxido Metálico -Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2011.
- [41] E. T. W. Neto, E. G. da Costa, R. T. de Souza e E. C. T. de Macedo,
 "Monitoração e Diagnósticos de Pára-Raios a ZnO," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 4, nº 3, pp. 170-176, 2006.
- [42] I. P. de Faria e M. L. B. d. Q. A. A. Martinez, "Electrical Performance Evaluation of Plasticized Polyolefin Formulation Developed for Manufacturing Surge Arresters Housings," *IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, n° 6, pp. 3429-3441, 2015.
- [43] C. de Salles, T. A. Nogueira, E. T. W. Neto, M. L. B. Martinez e A. A. A. de Queirox, "Effects of operation temperature in artificially aging of zinc oxide

varistors by high current short impulses," *Electric Power Systems Research*, vol. 134, pp. 145-151, 2016.

- [44] Q. Want, J. Li e C. Ji, "Study on Space Charge Characteristics during Aging Process of DC ZnO Varistors," em *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Atenas, Grécia, 2018.
- [45] S. Y. Chu, T. M. Yan e S. L. Chen, "Analysis of ZnO varistors prepared by the sol-gel method," *Ceramics International*, vol. 26, pp. 733-737, 2000.
- [46] M. Takehana, T. Nishino, K. Sugawara e T. Sugawara, "Additives Distribution and Electrical Properties in Zinc Oxide Varistors Prepared by a Wet Chemical Method," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 13, pp. 538-543, 19966.
- [47] V. Thver, S. L. Morissette, J. A. Lewis, B. A. Tuttle, J. A. Voigt e D. B. Dimos, "Direct-Wire Fabrication of Zinc Oxide Varistors," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 85, nº 1, pp. 123-128, 2002.
- [48] S. P. Cowman, A. J. Ratcliffe, D. A. Nicker, J. M. Shreeve e A. L. Oliver,
 "Varistor Manufacturing Method". Estdos Unidos da América Patente
 US6183685 B1, 06 Fevereiro 2001.
- [49] K. Eda, "Zinc Oxide Varistors," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 10, nº 6, pp. 736-746, 1989.
- [50] S. S. Kim, H. G. Cho, I. Choi, T. G. Park, C. H. Park e S. Y. Jung, "A Study on the Microstructure and Surge Characteristics of ZnO Varistor for Distribution Arrester," em *International Conference on Power System Technology Proceedings*, Kunming, China, 2002.
- [51] W. Hui, L. Shengtao e L. Jianying, "Residual Voltage Caused by Grain Boundary in ZnO Varistor Ceramics," em *International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*, Xi'an, China, 2011.

- [53] M. Kelleher e M. S. Hashmi, "Effect of the Processing Characteristics of ZnO Varistors Produced Using Vibratory Milling," em *International Conference* on Advances in MAterials and Processing Technologies, Paris, França, 2010.
- [54] D. Xu, D. M. Tang, L. Jiao, H. M. Yuan, G. P. Zhao e X. N. Cheng, "Effects of High-Energy Ball Milling Oxide-Doped and Varistor Ceramic Powder on ZnO Varistor," *Science Direct Trans. Nongerrous Met. Soc.*, vol. 22, pp. 1423-1431, 2012.
- [55] C. W. Nahm, "Effect of Small Changes in Sintering Temperature on Varistor Properties and Degradation Behavior of V-Mn-Nb-Gd co-doped zinc oxide ceramics," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, pp. 1176-1184, 2015.
- [56] J. Liu, J. L. He e W. C. Long, "The Dependence of Sintering Temperature on Schottky Barrier and Bulk Electron Traps of ZnO Varistors," *Science China*, vol. 54, nº 2, pp. 375-378, 2011.
- [57] C. F. Klingshirn, A. Waag, A. Hoffmann e J. Geurts, Zinc Oxide From Fundamental Properties Towards Novel Applications, Berlin, Alemanha: Bpringer-Verlag, 2010.
- [58] S. M. Seyyedbarzegar e M. Mirzaie, "Heat transfer analysis of metal oxide surge arrester under power frequency applied voltage," *Energy*, vol. 93, pp. 141-153, 2015.
- [59] H. Zhao, J. Hu, S. Chen, Q. Xie e J. He, "Improving age stability and energy absorption capabilities of ZnO varistor ceramics," *Ceramics International*, vol. 42, pp. 17880-17883, 2016.
- [60] A. M. Das, B. Ghosh, S. Dalai e B. Chatterjee, "Sensing Surface Contamination of Metal Oxide Surge Arrester Through Resistive Leakage Current

Signal Analysis by Mathematical Morphology," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, nº 16, pp. 9460-9468, 2020.

- [61] A. M. Das e S. Dalai, "Recent Development in Condition Monitoring Methodologies of MOSA employing Leakage Current Signal: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, nº 13, pp. 14559-14568, 2021.
- [62] IEEE Working Group 3.4.11, "Modelling of metal oxide surge arresters," *Transaction on Power Delivery*, vol. 7, nº 1, pp. 302-309, 1992.
- [63] T. Zhao, Q. Li e J. Quian, "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, pp. 751-756, 2005.
- [64] M. Khodsuz e M. Mirzaie, "Evaluatin of ultraviolet ageing, pollution and varistor degradation effects on harmonic contents of surge arrester leakage current," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 9, n° 8, pp. 979-986, 2015.
- [65] Novizon e A. M. Zulkurnain, "Electrical and Temperature Correlation to Monitor Fault Condition of ZnO Surge Arrester," em *International Conference on Information Tech., omputer and Electrical Engineering*, Semarang, Indonésia, 2016.
- [66] M. Abdullah e A. M. Zulkurnain, "Ageing Detection of Metal Oxide Surge Arrester using Fifth Harmonic Resistive Current," em *IEEE International Conference on Power and Energy*, Penang, Malaysia, 2020.
- [67] 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*, vol. 108, pp. 315-321, 2014.
- [68] F. F. Costa e A. J. M. Cardoso, "Harmonic and Interharmonic Identification Based on Improved Prony's Method," em IECON - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, França, 2006.
- [69] A. A. Girgis, "A Quantitative Study of Pitfalls in the FFT," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 4, pp. 434-439, 1980.
- [70] Electric Power Research Institute, *Fundamental Research on Metal Oxide* Varistors Technology - Final Report EPRI EL-2667, 1990.
- [71] ABNT, ABNT NBR IEC 60060-1 Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão. Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio.
- [72] J. Woodworth, "Arrester Condition Monitors A State of the Art Review," *Arrester Works*, 2012.
- [73] A. M. M. Diniz, Projeto e Avaliação do Desempenho do Desligador Automático Eletromecânico para Para-raios de Média Tensão, 2017.
- [74] H. Jinliang, C. Chenlu e H. Jun, "Electrical degradation of double-Schottky barrier in ZnO varistors," *AIP Advances*, vol. 6, pp. 030701-1-17, 2016.
- [75] W. Liu, L. Zhang, F. Kong, K. Wu, S. Li e J. Li, "Enhanced voltage gradient and energy absorption capability in ZnO varistor ceramics by using nanosized ZnO powders," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 828, pp. 151252 1-7, 2020.
- [76] M. S. Naidu e V. Kamaraju, High Voltage Engineering Seccond Edition, McGraw-Hill, 1996.
- [77] E. C. Sakshaug, J. J. Burke e J. S. Kresge, "Metal Oxide Arresters on Distribution Systems Fundamental Considerations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, nº 4, pp. 2076-2089, 1989.
- [78] W. A. Chisholm, "New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 26, nº 2, pp. 14-25, 2010.
- [79] P. Meng, X. Zhao, X. Yang, J. Wu, Q. Xie, J. H. J. He e J. He, "Breakdown phenomenon of ZnO varistors caused by non-uniform distribution of internal pores," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 4824-4830, 2019.

ANEXO A











Figura 85. Exemplo de impulso na forma 30/75 $\mu s.$

ANEXO B

Ea							In	npuls	os						
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10,6	Х										Х				
10,3		Х		Х		Х		Х		0		Х		Х	
9,90			0		0		0		0				0		0

Tabela 14. MAD, fabricante A, $4/10 \ \mu s$.

Tabela 15. MAD, fabricante A, $8/20 \ \mu s$.

Ea							Ir	npuls	OS						
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
9,34														Х	
9,08					Х		Х						0		0
8,71		Х		0		0		Х		Х		0			
8,62	0		0						0		0				

Tabela 16. MAD, fabricante A, $30/75 \,\mu s$.

Ea							Ir	npuls	os						
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8,42									Χ						
8,16						Χ		0		X				Х	
7,95	Х		Х		0		0				Х		0		0
7,68		0		0								0			

Tabela 17. MAD, fabricante B, $4/10 \ \mu s$.

Ea							Ir	npuls	os						
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
11,0											Х		Х		
10,8		Х								0		0		Χ	
10,4	0		Х		Х				0						Х
10,2				0		Χ		0							
9,89							0								

Tabela 18. MAD, fabricante B, $8/20 \ \mu s$.

Ea	Impulsos														
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
9,54			Х		Х										
9,28		0		0		Х						Х			
8,99	0						Х				0		Х		0
8,64								Х		0				0	
8,37									0						

Ea	Impulsos														
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8,49	Х										Х				
8,25		Х		Х		Х		Х		0		Х		Х	
7,80			0		0		0		0				0		0

Tabela 19. MAD, fabricante B, 30/75 $\mu s.$

Tabela 20. MAD, fabricante C, 4/10 $\mu s.$

Ea		Impulsos													
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10,3			Х												
10,1		0		Χ				Χ		Х					
9,81	0				Х		0		0		Х		Х		
9,56						0						0		Χ	
9,28															0

Tabela 21. MAD, fabricante C, $8/20 \ \mu s$.

Ea							Ir	npuls	OS						
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
8,53														Х	
8,31					Х		Х						0		0
8,09		Х		0		0		Х		Х		0			
7,92	0		0						0		0				

Tabela 22. MAD, fabricante C, $30/75 \ \mu s$.

Ea							Ir	npuls	Impulsos													
[kJ]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15							
8,15						Х																
7,91					0		Х		Х		Х		Х		0							
7,67		Х		0				0		0		0		0								
7,39	0		0																			